ISSN 1999-4508 (Print)
ISSN 2686-8253 (Online)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL
№ 2, 2025

РОСВОДРЕСУРСЫ
ИЗДАНИЕ ЖУРНАЛА ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ В РАМКАХ МЕРОПРИЯТИЙ, ФИНАНСИРУЕМЫХ ЗА СЧЕТ СУБСИДИЙ НА ИНЫЕ ЦЕЛИ

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ»
РОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ (ФГБУ РосНИИВХ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Косолапов А.Е., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лепихин А.П., д-р геогр. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Пермь, Россия)

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Беляев С.Д., д-р геогр. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)
Болгов М.В., д-р техн. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Борисова Г.Г., д-р геогр. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Веницианов Е.В., д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт водных проблем РАН (Москва, Россия)
Гареев А.М., д-р геогр. наук, профессор, Башкирский государственный университет (Уфа, Россия)
Зиновьев А.Т., д-р техн. наук, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН (Барнаул, Россия)
Козлов Д.В. профессор, д-р техн. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва, Россия)
Никифоров А.Ф., д-р хим. наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург, Россия)
Румянцев В.А., д-р геогр. наук, академик РАН, профессор, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Селезнёв В.А., д-р техн. наук, профессор, Институт экологии Волжского бассейна РАН (Тольятти, Россия)
Федоров Ю.А. д-р геогр. наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Хафизов А.Р., д-р техн. наук, профессор, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Уфа, Россия)
Шевчук А.В., д-р экон. наук, профессор, Совет по изучению производительных сил Всероссийской академии внешней торговли Минэкономразвития России (Москва, Россия)
Шмакова М.В., д-р геогр. наук, Институт озероведения РАН (Санкт-Петербург, Россия)
Ясинский С.В., д-р геогр. наук, Институт географии РАН (Москва, Россия)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СОВЕТ

Габриелян Б.К., д-р биол. наук, профессор, Национальная академия наук Республики Армения (Ереван, Республика Армения)
Гюнтер Блешль, профессор, Институт гидротехники и управления водными ресурсами (Вена, Австрия)
Драган А. Савич, профессор, Центр водных систем Университета Эксетера (Эксетер, Великобритания)
Карло Гуальтери, профессор, Университет Неаполя им. Фридриха II (Неаполь, Италия)
Кью Джи Ванг, профессор, Университет Мельбурна (Мельбурн, Австралия)
Слободан П. Симонович, профессор, Университет Западного Онтарио (Онтарио, Канада)

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ РЕДАКТОР

Валек Н.А., канд. филол. наук, Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов (Екатеринбург, Россия)

ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ:

ПРОБЛЕМЫ, ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ

WATER SECTOR OF RUSSIA:

PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC/PRACTICAL JOURNAL

№ 2, 2025

ЕКАТЕРИНБУРГ
YEKATERINBURG

Журнал входит в ядро РИНЦ и в список журналов RSCI
(Russian Science Citation Index)

РОСВОДРЕСУРСЫ
PUBLISHING OF THE JOURNAL IS EFFECTED WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STATE ASSIGNMENT APPROVED BY FEDERAL AGENCY OF WATER RESOURCES

FOUNDER OF THE JOURNAL «WATER SECTOR OF RUSSIA: PROBLEMS, TECHNOLOGIES, MANAGEMENT»
RUSSIAN RESEARCH INSTITUTE FOR INTEGRATED WATER MANAGEMENT AND PROTECTION (RosNIIVKh)

EDITORIAL BOARD

CHIEF EDITOR

Aleksey E. Kosolapov, Professor, Dr. Sc. (Technical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

DEPUTY CHIEF EDITOR

Anatoliy P. Lepikhin, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection Kama Branch, Institute of Mining of the Russian Academy of Sciences (Perm, Russia)

MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD

Sergey D. Belayev, Dr. Sc. (Geographical), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)
Mikhail V. Bolgov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Galina G. Borisova, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Evgeniy V. Venitsianov, Dr. Sc. (Physical/mathematical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Water Problems (Moscow, Russia)
Aufar M. Gareyev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Bashkir State University, Chair of Hydrology and Geo/ecology (Ufa, Russia)
Aleksandr T. Zinovyev, Dr. Sc. (Technical), Russian Academy of Sciences Siberian Branch Institute of Water and Environmental Problems (Barnaul, Russia)
Dmitriy V. Kozlov, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Aleksandr F. Nikiforov, Dr. Sc. (Chemical), Professor, Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Vladislav A. Rumyantsev, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of Limnology, (St. Petersburg, Russia)
Vladimir A. Seleznyev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Academy of Sciences Institute of the Volga Basin Ecology Laboratory for Water Bodies Monitoring (Togliatti, Russia)
Yuri A. Fedorov, Dr. Sc. (Geographical), Professor, Southern Federal University (Rostov-na-Donu, Russia)
Airat R. Khafizov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ufa, Russia)
Anatoliy V. Shevchuk, Dr. Sc. (Economic), Professor, Ministry of Economic Development of the Russian Federation Russian Academy of External Trade Board for Studying Productive Forces (Moscow, Russia)
Marina V. Shmakova, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Limnology (St. Petersburg, Russia)
Sergey V. Yasinskiy, Dr. Sc. (Geographical), Russian Academy of Sciences Institute of Geography (Moscow, Russia)

INTERNATIONAL BOARD

Bardukh K. Gabrielyan, Dr. Sc. (Biological), Professor, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia (Yerevan, Armenia)
Günter Blöschl, Professor, Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management (Vienna, Austria)
Dragan A. Savić, Professor, Centre for Water Systems University of Exeter (Exeter, Great Britain)
Carlo Gualteri, Professor, Federico II University (Napoli, Italy)
Q.J. Wang, Professor, University of Melbourne (Melbourne, Australia)
Slobodan P. Simonovic, Ph.D, University of Western Ontario (Ontario, Canada)

EXECUTIVE EDITOR

Nataliya A. Valek, Cand. Sc. (Philological), Russian Research Institute for Integrated Water Management and Protection (Ekaterinburg, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек
Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи
В.Ю. Филимонов, О.В. Ловцкая.....5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Влияние климатических изменений на влажность почвы
С.А. Лавров.....19

Оценка изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея в современных климатических условиях
В.В. Зуев, В.А. Уйманова, Д.А. Вершинин, А.В. Павлинский.....40

Статистические характеристики грунтовых вод Теплостанской возвышенности Москвы
Н.Д. Дубов, О.М. Розенталь.....52

Изменения годового модуля стока малых рек российской части бассейна реки Урал
И.А. Жуков, Д.Н. Айбулатов.....72

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА

Экспертное и общественное мнение по оценке гидрологической ситуации в рамках Якутского водохозяйственного узла
В.П. Бондарев, А.С. Завадский, В.А. Чаленко.....90

Требования к оформлению материалов.....107

CONTENT

WATER/ECONOMIC SECTOR MANAGEMENT

Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 2. Influence of the number of measurements on the results of the inverse problem calculation
V.Y. Filimonov, O.V. Lovtskaya.....5

WATER RESOURCES STUDY

The effect of climate change on soil moisture
S.A. Lavrov.....19

Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei in contemporary climatic conditions
V.V. Zuev, V.A. Uymanova, D.A. Vershinin, A.V. Pavlinsky.....40

Statistical characteristics of groundwater in the Teplostanskaya Upland of Moscow
N.D. Dubov, O.M. Rozental.....52

Changes in the annual runoff module of small rivers in the Russian part of the Ural River basin
I.A. Zhukov, D.N. Aybulatov.....72

INFORMATION-ANALYTICAL SUPPORT OF THE WATER/ECONOMIC SECTOR FUNCTIONING

Expert and social assessment of hydrological situation within the framework of Yakut water-economic hub
V.P. Bondarev, A.S. Zavadskiy, V.A. Chalenko.....90

Requirements for the articles to be accepted.....107

УДК: 556.535.3 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18*

Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек

Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи

В.Ю. Филимонов, О.В. Ловцкая

lov@iwep.ru

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При решении обратных задач восстановления пространственного распределения расходных характеристик диффузного стока загрязнителей на участках малых рек неизбежно возникает вопрос, связанный с необходимым числом расчетных точек. Для проведения корректного математического анализа число используемых расчетных точек должно быть весьма значительным (сотни). Реальный натурный эксперимент, как правило, ограничивается небольшим количеством точек (десятками). Однако в настоящее время влияние числа расчетных точек на устойчивость решения обратных задач для уравнения переноса консервативных загрязнителей мало изучено, хотя этот вопрос является ключевым при сопоставлении данных математического расчета и натурных измерений. В представленной работе проведен анализ влияния числа измерений концентрации растворенного загрязнителя на величину его полного массового расхода в процессе диффузного стока на участках малых рек. **Методы.** Расчет проводился на основе метода Монте-Карло при рандомизации значений концентрации загрязнителя. **Результаты.** В ходе реализации численного эксперимента для заданного набора тестовых функций установлено, что устойчивые значения искомых параметров (полный массовый расход и число Пекле) зависят от количества расчетных точек, определяющих пространственное распределение концентрации загрязнителя на исследуемом участке. Выяснено, что устойчивые значения параметров определяются числом точек, в пять – десять раз превосходящим число неизвестных коэффициентов аппроксимирующего полинома. Проанализирована зависимость значений искомых параметров от числа расчетных точек для результатов натурных измерений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: диффузный сток, концентрация загрязняющих веществ, полный массовый расход, число Пекле, количество измерений.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20023, проект (https://rscf.ru/project/24-27-20023/).

Для цитирования: Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек. Сообщение 2. Влияние числа измерений на результаты расчета обратной задачи // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18, EDN: SGQHKD

© Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. 2025

Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: Communication 2. Influence of the number of measurements on the results of the inverse problem calculation

Valery Y. Filimonov, Olga V. Lovtskaya ✉
✉ lov@iwep.ru
Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. When analyzing the inverse problems of reconstruction the spatial distribution of the diffuse pollutant runoff flow characteristics in areas of small rivers, the question related to the required number of calculation points inevitably arises. To conduct a correct mathematical analysis, the number of calculation points used must be quite significant (usually hundreds). A real natural experiment is usually limited to a small number of points (dozens). It can be stated that to date, the question of the influence of the number of calculation points on the stability of the inverse problems solution has been little studied. Meanwhile, it is very relevant when comparing data from mathematical calculations and natural measurements. In the presented work, an analysis of the influence of the number of a dissolved pollutant concentration measurements on the value of its total mass flow rate in the process of diffuse runoff in areas of small rivers was carried out. **Methods.** The calculation was carried out based on the Monte Carlo method with randomization of the dissolved pollutant concentration values. **Results.** In the process of implementing a numerical experiment for a given set of test functions, it was established that the stable values of the sought parameters (total mass flow rate and Peclet number) depend on the number of calculation points that determine the spatial distribution of the pollutant concentration in the study area. It was found that stable values of the sought parameters are determined by a number of points that is five to ten times greater than the number of unknown coefficients of the approximating polynomial. The dependence of the values of the sought parameters on the number of calculation points for the results of field measurements is analyzed.

KEYWORDS: diffuse runoff, pollutant concentration, total mass flow rate, Peclet number, number of measurements

Funding: The research was supported by the RSF grant (project No. 24-27-20023, https://rscf.ru/project/24-27-20023/).

For citation: Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V. Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: 2. Influence of the number of measurements on the results of the inverse problem calculation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025 No. 2. P. 5–18. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-5-18, EDN: SGQHKD

ВВЕДЕНИЕ

Как следует из многочисленных исследований, посвященных решению обратных задач восстановления диффузного стока загрязнителей при загрязнении малых рек [1–9], вопрос о количестве необходимых измерений распределения концентрации загрязняющих веществ мало изучен. В процессе реализации численного эксперимента при задании случайных отклонений от расчетных значений возникают вопросы, связанные с некорректностью рассматриваемой задачи (эти проблемы обсуждены, например, в исследовании [10]). Как следствие, в этом случае необходимо использовать

те или иные способы регуляризации, которые требуют наличия большого массива данных (как правило, сотни расчетных точек [11]).

В процессе математического моделирования исследователь может не ограничивать себя в этом отношении, вводя в рассмотрение любое количество точек, в которых задается величина концентрации загрязнителя (обычно этот вопрос в исследованиях не обсуждается). Например, применение метода регуляризации в работе [11] требует около 400 точек для восстановления полного массового расхода загрязнителя. Как правило, число точек определяется шагом интегрирования соответствующего уравнения адвекции-диффузии. Однако количество данных в реальном натурном эксперименте весьма ограничено [12–19]. Возникает закономерный вопрос, насколько корректно применение методов обратных задач к небольшому числу натурных измерений. В работе [20] с использованием метода оптимизации проведена оценка удельного массового расхода загрязнителей и соответствующих чисел Пекле для шести точек измерения. Показано, что проведенный расчет позволяет получить некоторые эффективные значения параметров. Вместе с тем исследований, посвященных прямому сопоставлению расчетных данных и данных натурных измерений, в доступной литературе обнаружить не удалось. Анализ этого вопроса представляется чрезвычайно важным, поскольку ответ на него внесет ясность в отношении обозначенной выше дилеммы и позволит адаптировать общую методологию расчета к данным натурных измерений.

В работе [10] рассмотрена методика расчета полного массового расхода консервативного загрязнителя, поступающего в водоток при заданном числе точек, определяющих распределение концентрации (50 точек). Очевидно, что в зависимости от характера поведения тестовой функции (массовый расход загрязнителя на единицу длины) устойчивость результатов расчета будет зависеть от количества точек наблюдения для натурного или численного эксперимента. Целью настоящего исследования является установление пределов устойчивых результатов расчета в зависимости от числа измерений. В качестве исходных данных использованы результаты расчета, приведенные в работе [10].

МЕТОДЫ РАСЧЕТА

В [10] введены в рассмотрение следующие тестовые функции для удельного массового расхода загрязнителя на участке от 0 до 1:

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2 + 0{,}3z - 0{,}25z^2, \tag{1}$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2\mathrm{e}^z + 0{,}2z^4, \tag{2}$$

$$\tilde{\varphi}(z) = 0{,}2 + 0{,}2\mathrm{e}^{-\left(\frac{z-0{,}3}{0{,}1}\right)^2} + 0{,}45\mathrm{e}^{-\left(\frac{z-0{,}7}{0{,}3}\right)^2}. \tag{3}$$

Рассматривалась обратная задача для восстановления распределения полного массового расхода:

$$\tilde{\Phi}(z) = \int_0^z \tilde{\varphi}(z)dz. \tag{4}$$

При этом функция $\tilde{\Phi}(z)$ представлена в виде полинома:

$$\tilde{\Phi}(z) = \sum_{n=1}^{m} a_n z^n. \tag{5}$$

На основе стационарного уравнения адвекции-диффузии с использованием методов нелинейной глобальной оптимизации и Монте-Карло установлено, что для функций (1) – (3) третья степень полинома дает вполне устойчивые и корректные результаты решения обратной задачи. Для реализации метода Монте-Карло использовалось N = 1000 вариантов случайных отклонений величин обезразмеренной концентрации в интервале δ = ± 0,05. Для анализа влияния числа измерений на результаты решения обратной задачи в настоящей работе применена следующая методика. Для каждой из функций (1) – (3) проведен расчет с использованием метода Монте-Карло при N = 1000, δ = ± 0,05 с целью анализа устойчивости результатов расчета основных параметров: числа Пекле α и полного массового расхода загрязнителя $\widetilde{\Phi}(1)$ на всем исследуемом интервале. Варьируемым параметром является число расчетных точек k для разных степеней полинома (5).

На рис. 1 представлены результаты расчета распределения концентрации загрязнителя и полного массового расхода для функции (3) при различных степенях полинома и различном числе расчетных точек при известных значениях α = 10, θ_1 = 1,5, где α – число Пекле, θ_1 – обезразмеренная концентрация загрязнителя в нижнем створе [10].

Установлено, что при заданной степени полинома существует минимальное число точек, при котором расчет еще дает устойчивые результаты (при использовании меньшего числа точек наблюдаются физически нереализуемые значения искомых параметров, которые при указанных условиях рандомизации начинают колебаться в широких пределах). Для m = 1 минимально необходимое число точек 5, для m = 2 – 10, для m = 3 – 35. На рис. 1 отражено, что в областях параметрической устойчивости результат восстановления полного расхода слабо зависит от числа расчетных точек. Наибольшие видимые отклонения (порядка 15 %) наблюдаются при k = 5 для первой степени полинома (рис. 1*а*). Однако уже при k = 10 отклонения составляют менее 1 %. При m = 2, m = 3 кривые практически совпадают друг с другом и с точным решением прямой задачи [10].

В [10] установлено, что при заданных параметрах рандомизации для функции (3) величина полного расхода $\widetilde{\Phi}(1)$ = 0,49. Для m = 1 она составляет $\widetilde{\Phi}(1)$ = 0,4. Однако при m = 2, m = 3 эта величина близка к расчетной ($\widetilde{\Phi}(1) \approx 0{,}5$). Точное решение задачи в работе [10] дает $\widetilde{\Phi}(1) \approx 0{,}46$. Таким образом, для получения корректных результатов вполне достаточно второй степени полинома при расчете на 10 и более точках исследуемого интервала. Следует заметить, что расчет для тестовых функций (1) и (2) приводит к аналогичным результатам.

Однако определение числа Пекле и расчет полного массового расхода загрязнителя требуют более подробного количественного анализа. На рис. 2 приведены результаты расчетов зависимостей параметров α, $\widetilde{\Phi}(1)$ от числа расчетных точек для тестовой функции (1). Следует напомнить, что данная функция слабо меняется с координатой и распределение удельного массового расхода на рассматриваемом интервале близко к однородному.

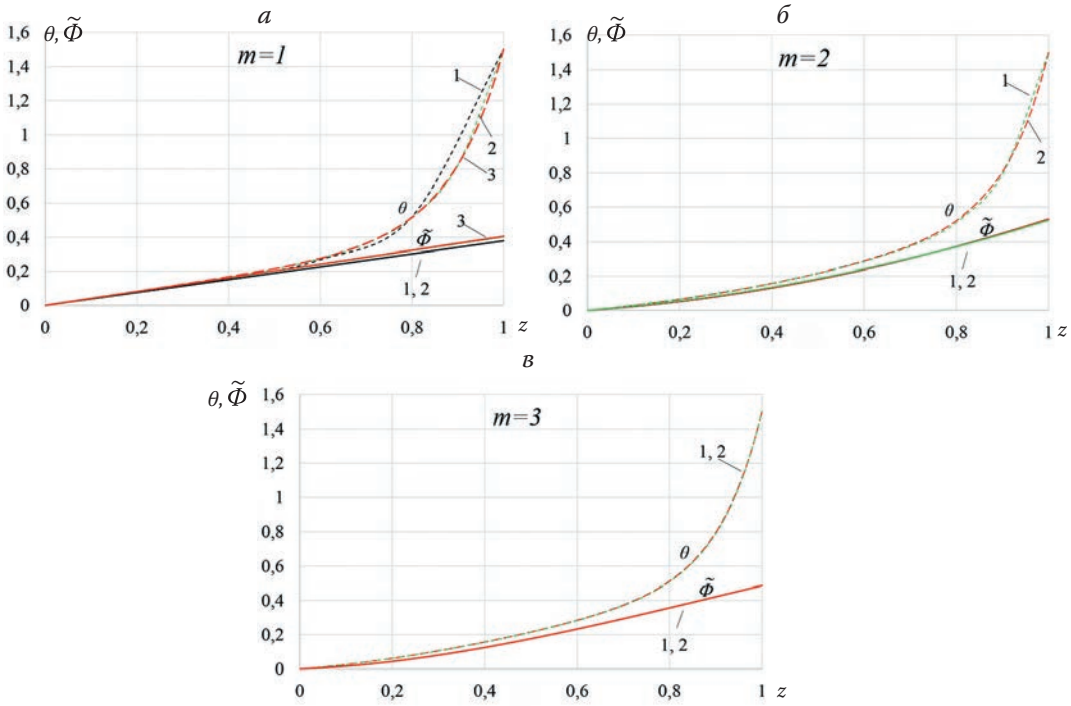


Рис. 1. Распределение концентрации загрязнителя θ и полного массового расхода $\tilde{\Phi}$ для функции (3) при различных степенях полинома m и различном числе расчетных точек k: *а* – полином первой степени m=1, 1–k=5 , 2–k=10, 3–k=50; *б* – полином второй степени m=2, 1–k=10, 2–k=50; *в* – полином третьей степени m=3, 1–k=10, 2–k=50.

Fig. 1. Distribution of pollutant concentration θ and total mass flow rate $\tilde{\Phi}$ for function (3) at different degrees of the polynomial and different numbers of calculation points k: *a* – first degree of polynomial m=1, 1–k=5 , 2–k=10, 3–k=50; *b* – second-degree of polynomial m=2, 1–k=10, 2–k=50; *c* – third degree of polynomial m=3, 1–k=10, 2–k=50.

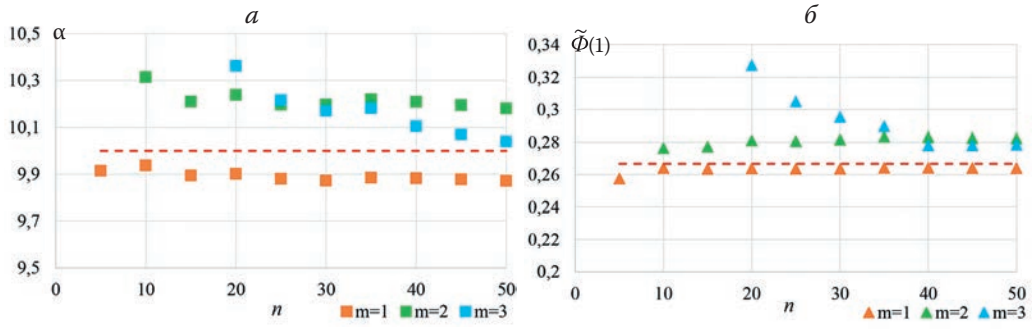


Рис. 2. Зависимости параметров α, $\tilde{\Phi}(1)$ от числа расчетных точек для функции (1) при различных степенях полиномов: *а* – восстановленное значение числа Пекле; *б* – восстановленная величина полного массового расхода. Горизонтальные пунктирные линии определяют точное решение прямой задачи [10].

Fig. 2. Dependences of parameters α, $\tilde{\Phi}(1)$ on the number of calculation points for function (1) for various degrees of polynomials: *a* is reconstructed value of the Peclet number; *b* is reconstructed value of the total mass flow rate. Horizontal dotted lines determine the exact solution of the direct problem [10].

Как следует из данных рис. 2*a*, для полинома первой степени величина критерия Пекле близка к точному значению и слабо зависит от числа расчетных точек вплоть до $k = 5$, при этом результаты расчета являются устойчивыми. Полином второй степени дает сравнительно завышенные значения величины α, результаты расчета также являются устойчивыми по отношению к изменению числа расчетных точек до $k = 10$. Полином третьей степени дает наиболее близкое к точному значение параметра α при $k = 50$, однако с уменьшением числа расчетных точек наблюдается рост величины параметра, а при $k = 20$ происходит потеря устойчивости. Можно сделать вывод, что полиномы первой и второй степени дают значения полного массового расхода, слабо зависящие от числа точек (рис. 2*b*). Таким образом, несмотря на то, что полиномы первой и второй степени показывают вполне корректные и устойчивые результаты, наиболее точно значения параметров определяет полином третьей степени при числе точек $k = 50$.

Иная ситуация наблюдается для функции (2) (рис. 3): соответствующая зависимость имеет ускоренный экспоненциальный рост. Результаты расчета являются устойчивыми относительно используемого числа точек, при этом параметр α наиболее точно определяется по полиному третьей степени (рис. 3*a*). В отличие от функции (1) полином первой степени дает худший результат, полином второй степени – удовлетворительный, при этом устойчивость расчета определяется минимум десятью точками. Последнее объясняется тем, что функция (1) на рассматриваемом интервале меняется незначительно, в то время как функция (2) характеризуется быстрым ростом, что делает линейную аппроксимацию для нее непригодной. Расчет величины $\widetilde{\Phi}(1)$ приводит к аналогичным результатам (рис. 3*b*). Для полинома третьей степени устойчивые результаты проявляются начиная с тридцати точек.

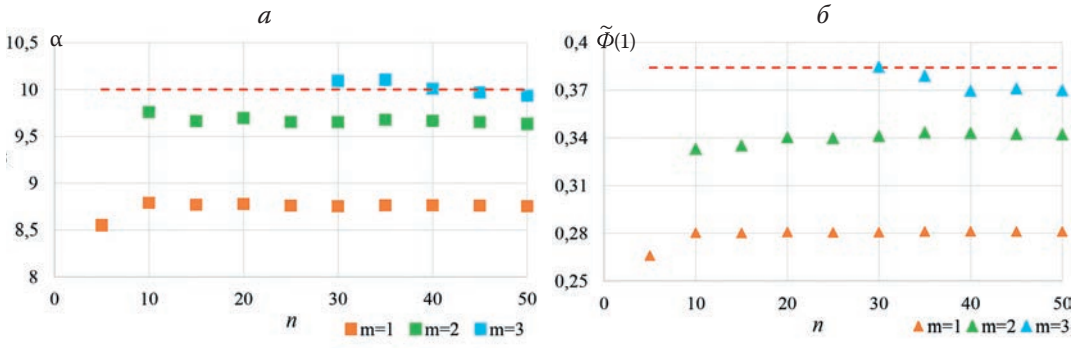


Рис. 3. Зависимости параметров α, $\widetilde{\Phi}(1)$ от числа расчетных точек для функции (2) при различных степенях полиномов: *а* – восстановленное значение числа Пекле; *б* – восстановленная величина полного массового расхода.

Fig. 3. Dependences of parameters α, $\widetilde{\Phi}(1)$ on the number of calculation points for function (2) for various degrees of polynomials: *a* is the reconstructed value of the Peclet number; *b* is the reconstructed value of the total mass flow rate.

Результаты расчета параметров α, $\widetilde{\Phi}(1)$ для функции (3) приведены на рис. 4. Тестовая функция является немонотонной и имеет на рассматриваемом интервале два максимума [10]. Полиномы второй и третьей степени дают близкие результаты как в отношении расчета числа Пекле, так и в отношении расчета полного массового расхода (рис. 4). При этом результаты расчетов также являются устойчивыми относительно числа расчетных точек. Однако и в этом случае предпочтительнее третья степень полинома при $k \geq 35$. Расчет показывает, что во всех рассмотренных случаях увеличение числа расчетных точек не приводит к изменению значений параметров для всех степеней полиномов. Здесь следует заметить, что рандомизация исходных данных не дает возможности получения точных результатов, определенных из решения прямой задачи, отклонение значений определяемых величин от их точных значений составляет 5–7 %.

Очевидно, что количество точек, необходимых для корректного расчета рассмотренных выше величин, зависит от поведения тестовых функций. Во всех рассмотренных случаях наиболее точные результаты соответствуют полиному третьей степени, которая является наивысшей из рассматриваемых. Однако для получения устойчивых результатов необходимо иметь сравнительно большое число точек (за исключением простейшей функции (1)). Действительно, для функций (2) и (3) устойчивые результаты начинают проявляться с $k = 30$ (функция (2)) и $k = 35$ (функция (3)). Лимитирующим фактором является наибольшая степень полинома, при которой для имеющихся данных возможна рандомизация в рассматриваемом интервале. Чем выше степень полинома, тем точнее оценки определяемых величин. В свою очередь, степень полинома, при которой реализуются устойчивые результаты, зависит от числа расчетных точек. Можно предположить, что критерием корректности расчета является близость значений рассчитываемых параметров для полиномов второй и третьей степеней и независимость их величин от числа расчетных точек.

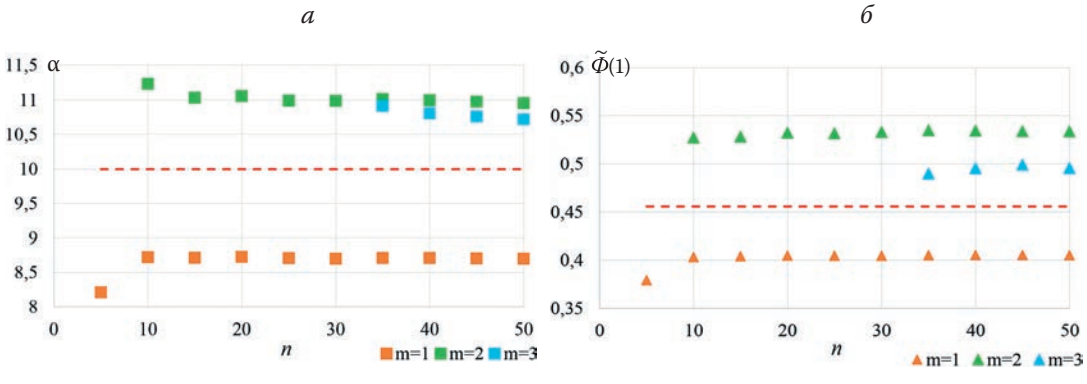


Рис. **4.** Зависимости параметров α, $\widetilde{\Phi}(1)$ от числа расчетных точек для функции (3):
а – восстановленное значение числа Пекле;
б – восстановленная величина полного массового расхода.
Fig.4. Dependences of parameters α, $\widetilde{\Phi}(1)$ n the number of calculation points for function (3) for various degrees of polynomials: *a* is the reconstructed value of the Peclet number; *b* is the reconstructed value of the total mass flow rate.

В заключение данного раздела следует заметить, что расчет, проведенный при других значениях числа Пекле и концентрации загрязнителя на правой границе θ_1 для заданных тестовых функций (1) – (3), приводит практически к тем же результатам в отношении устойчивости значений определяемых величин.

Натурные измерения

Для приложения приведенной выше методики к результатам натурных измерений были использованы данные работы [19], рассмотренные в [10]. На участке реки длиной 80 км проведено шесть измерений концентрации растворенного кобальта (*Co*). С использованием нелинейной оптимизации определен глобальный минимум, соответствующий первой степени полинома (5) при a_1 = 0,228, α = 7,3. Для проверки корректности рассчитанных величин предложено увеличить количество расчетных точек до k = 100 с дальнейшим применением метода Монте-Карло с параметрами рандомизации (N = 1000, δ = ±0,05). На рис. 5 отражены распределения концентрации и полного массового расхода загрязнителя для числа точек при заданных условиях рандомизации.

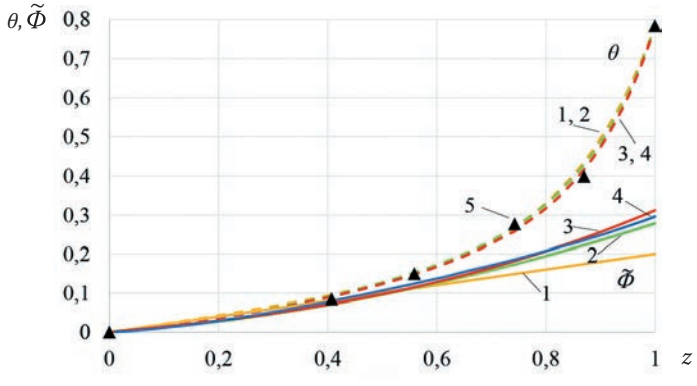


Рис. 5. Распределение концентрации растворенного *Co* θ и соответствующего полного массового расхода $\tilde{\Phi}$ на участке реки Хоксбери–Непин [19], полученное с использованием метода нелинейной оптимизации при k=100 и разных степенях полинома (5): 1–m=1, 2–m=2, 3–m=3, 4–m=4; 5 – результаты натурного эксперимента.
Fig. 5. Distribution of dissolved *Co* θ concentration and corresponding total mass flow rate $\tilde{\Phi}$ in the Hawkesbury–Nepean River section [19], obtained using the nonlinear optimization method at 100 with different degrees of the polynomial (5): 1–m=1, 2–m=2, 3–m=3, 4–m=4; 5 is results of field experiment.

Как следует из рис. 5, результаты расчета распределения концентрации слабо зависят от степени полинома, что характерно для некорректной обратной задачи. Однако для распределения полного массового расхода с ростом степени полинома отчетливо наблюдается сходимость расчетных кривых к некоторой предельной зависимости, определяемой величиной $\tilde{\Phi}(1) \approx 0{,}3$. Последнее более подробно иллюстрируется рис. 6, на котором представлены соответствующие зависимости параметров от числа расчетных точек.

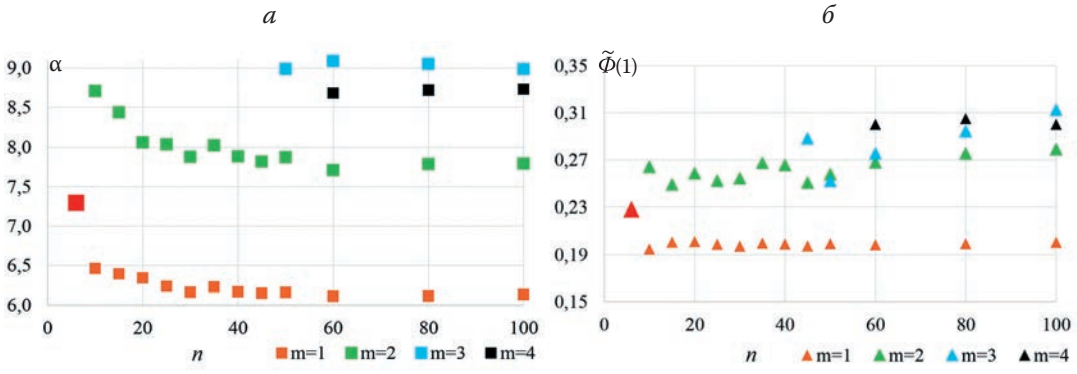


Рис. 6. Зависимости параметров: *а* – α; *б* – $\widetilde{\Phi}(1)$ от числа расчетных точек для различных степеней полинома для натурных измерений распределения концентрации растворенного *Co*.

Fig. 6. Dependences of the parameters *a* – α; *b* – $\widetilde{\Phi}(1)$ on the number of calculation points for various degrees of the polynomial for field measurements of the distribution of dissolved *Co* concentration.

Приведенные зависимости во многом аналогичны рассмотренным ранее для заданных тестовых функций. Устойчивые результаты расчета числа Пекле (рис. 6*а*) наблюдаются для второй степени полинома при $k \geq 20$, для третьей степени полинома при $k \geq 50$, для четвертой степени полинома при $k \geq 60$. Можно предположить, что в данном случае мы видим сходимость рассчитываемых величин к неким предельным значениям, которые определяются режимом рандомизации исходных данных. Таким образом, если предположить наличие ста измерений при заданных условиях рандомизации, можно говорить о вполне определенных значениях величин искомых параметров: $\alpha \approx 8{,}7$, $\widetilde{\Phi}(1) \approx 0{,}3$. Следовательно, шести измерений в данном случае недостаточно и полученные результаты расчета ($\widetilde{\Phi}(1) \approx 0{,}22$, $\alpha \approx 7{,}3$) можно рассматривать как первое приближение, дающее оценочные значения параметров.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В математических моделях, связанных с решением обратных задач для уравнения адвекции-диффузии, ключевым вопросом является восстановление распределения удельного массового расхода загрязнителя на рассматриваемом участке по данным распределения его концентрации [1–9]. Однако не менее значим и вопрос расчета полного массового расхода, который характеризует диффузный сток. Эта величина является вполне определенным расчетным параметром для данного набора натурных измерений, наряду с числом Пекле, которое априори неизвестно (этот вопрос подробно рассмотрен в работе [10]). Таким образом, в данном случае определению подлежат не распределенные, а сосредоточенные (эффективные) параметры, что в известной степени делает задачу более определенной.

При решении обратных задач указанного класса неизбежно возникает вопрос, касающийся объема необходимой информации о пространственном распределении концентрации растворенных загрязнителей. Очевидно, это не

является проблемой при математическом моделировании, однако при анализе набора натурных измерений является определяющим. Действительно, для проведения корректного математического анализа с использованием методов регуляризации число расчетных точек должно быть весьма значительным (сотни точек). Вместе с тем возникает резонный вопрос: какое количество точек необходимо для получения устойчивых результатов расчета, обозначенных выше эффективных параметров?

В представленной работе проведен анализ пределов устойчивости результатов расчета полного массового расхода и числа Пекле относительно количества точек, используемых в численном и натурном экспериментах. Варьируемыми параметрами являлись число расчетных точек и степень полинома для определения полного массового расхода (5). Для расчета использован набор независимых тестовых функций и параметры рандомизации, рассмотренные в [10]. Установлено, что наилучшим образом неизвестные параметры определяются третьей степенью полинома, однако для этого необходимо использовать порядка $k = 50$ точек. Обобщая полученные результаты, можно констатировать следующее:

– для каждой степени полинома существует нижний предел по числу расчетных точек, меньше которого результаты расчета перестают быть устойчивыми;

– если число расчетных точек превышает указанный предел, результаты расчета параметров слабо зависят от их числа;

– с ростом степени полинома значения рассчитываемых параметров стремятся к некоторому предельному значению.

Количество параметров определяется степенью полинома и неизвестным числом Пекле. Как следует из расчетов, число расчетных точек для получения надежных и устойчивых результатов должно превышать приблизительно в 10 раз число неизвестных параметров (число коэффициентов плюс число Пекле), что соответствует [21]. Действительно, для полинома третьей степени во всех рассмотренных случаях необходимое количество точек должно быть порядка 40, для полинома второй степени – порядка 30, для полинома первой степени – порядка 20.

При анализе натурных измерений получены результаты, аналогичные тестовым расчетам. Принимая результаты шести измерений как первое приближение, проведен расчет для числа измерений $k = 100$. Установлено, что с ростом числа расчетных точек и степени полинома наблюдается сходимость рассчитываемых величин к неким предельным значениям. Таким образом, можно предположить, что критерием корректности результатов расчета в данном случае является устойчивость значений определяемых параметров по отношению к числу расчетных точек и степени полинома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе впервые проведен анализ влияния числа расчетных точек на решение обратной задачи определения полного массового расхода растворенного загрязнителя и числа Пекле при загрязнении малых рек. При

рандомизации расчетных данных использован метод Монте-Карло для тысячи реализаций случайного отклонения значений концентрации загрязнителя.

В ходе численного эксперимента для заданных тестовых функций установлено, что с ростом степени аппроксимирующего полинома возрастает необходимое число расчетных точек, обеспечивающих устойчивость значений искомых величин. Выяснено, что для получения надежных результатов число расчетных точек должно приблизительно в 10 раз превышать число неизвестных параметров (в данном случае это коэффициенты полинома и неизвестное число Пекле). Наиболее достоверные значения величин для анализируемых тестовых функций соответствуют полиному третьей степени при числе расчетных точек более сорока. Полином первой степени позволяет произвести разумную оценку значений искомых параметров. В сценарных расчетах показано, что увеличение числа расчетных точек обусловливает сходимость определяемых величин к некоторым устойчивым значениям.

Предложенный метод позволяет при малом количестве натурных измерений получить устойчивые результаты расчета величин, определяющих диффузный сток консервативных загрязнителей малых рек. Метод может быть использован для мониторинга антропогенной нагрузки при формировании диффузного загрязнения водных объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shen J., Jia J.J, Sisson G. Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River Maryland. // Water research. 2006. Vol. 40 (18). P. 3333–3342. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035.
2. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach. // Water Resources Research. 2005. Vol. 41 (7). P. 1–13. https://doi.org/10.1029/2004wr003754.
3. Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S. An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification. // Physics and Chemistry of the Earth. 2022. Vol. 128 (2). 103255. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255.
4. Rashedi K. A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials. // Mathematical Methods in the Applied Sciences. 2021. Vol. 44 (17). P. 12980–12997. https://doi.org/10.1002/mma.7601.
5. Sousa D.M., Roberty N.C. An inverse source problem for the stationary diffusion-advection decay equation. // Inverse Problems in Science and Engineering. 2012. Vol. 20 (7). P. 891–915. https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466.
6. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data. // Inverse Problems in Science and Engineering. 2017. Vol. 25 (2). P. 279–308. https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396.
7. Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S. Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modeling. // Water Science and Technology. 2007. Vol. 56 (1). P. 155–162. https://doi.org/10.2166/wst.2007.447.
8. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations. // Journal of Computational Physics. 2002. Vol. 470. 111609. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609.

9. Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T. Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2018. Vol. 54. P. 233–247. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002.
10. Филимонов В.Ю., Ловцкая О.В. Полуэмпирический метод расчета диффузного стока консервативных загрязнителей на участках малых равнинных рек: 1. Восстановление полного массового расхода загрязнителей // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 1. С. 5–23. https://doi. org/10.35567/19994508-2025-1-5-23, EDN BBABKI.
11. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plaint rivers. // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2023. Vol. 11 (4). P. 14–28. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28.
12. Filimonov V.Y., Zinoviev A.T., Lovtskaya O.V. Method for estimating the pollutant flow rate under diffuse pollution of small lowland rivers. // Mathematics and computers in simulation. 2021. Vol. 182 (9). P. 807–818. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.12.003.
13. Chueh Y.-Y., Fan C., Huang Y.-Z. Copper concentration simulation in a river by SWATWASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies. // Journal of Environmental Management. 2021. Vol. 279. 111613. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111613.
14. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities. // Sustainability. 2023. Vol. 15 (10). 8389. https://doi.org/10.3390/su15108389.
15. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows. // Environmental Science and Technoljgy. 2020. Vol. 54 (24). P. 15742–15750. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.0c04016.
16. Ren J, Hao J, Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China. // Environmental science and pollution research. 2021. Vol. 28. 2904–2913. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3.
17. Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W. Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region. // Environmental Technology & Innovation. 2020. Vol. 20. 101043. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101043.
18. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan. // Environmental monitoring and assessment. 2021. Vol. 193 (12). 814. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1.
19. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia. // Science of the total environment. 1998. Vol. 217 (3). P. 201–230. https://doi.org/10.1016/s00489697(98)00188-0.
20. Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Diffuse pollution on small rivers. Features of distribution of dissolved pollutant concentrations. 2021. // Eurasian journal of mathematical and computer applications. 2021. Vol. 9 (3). P. 39–52. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2021-9-3-39-52.
21. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis. New York: Wiley, 1998. 736 p.

REFERENCES

1. Shen J., Jia J.J., Sisson G. Inverse estimation of nonpoint sources of fecal coliform for establishing allowable load for Wye River Maryland. *Water research*. 2006. Vol. 40 (18). 3333–3342. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.035.
2. Boano F., Revelli R., Ridolfi L. Source identification in river pollution problems: A geostatistical approach. *Water Resources Research*. 2005. Vol. 41 (7). 1–13. https://doi.org/10.1029/2004wr003754.
3. Permanoon E., Mazaheri M., Amiri S. An analytical solution for the advection-dispersion equation inversely in time for pollution source identification. 2022. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol. 128 (2). 103255. https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103255.

4. Rashedi K. A numerical solution of an inverse diffusion problem based on operational matrices of orthonormal polynomials. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*. 2021. Vol. 44 (17). 12980–12997. https://doi.org/10.1002/mma.7601.
5. Sousa D.M., Roberty N.C. An inverse source problem for the stationary diffusion-advection decay equation. *Inverse Problems in Science and Engineering.* 2012. Vol. 20 (7). 891–915. https://doi.org/10.1080/17415977.2011.609466
6. Kulbay M., Mukanova B., Sebu C. Identification of separable sources for advection diffusion equations with variable diffusion coefficient from boundary measured data. *Inverse Problems in Science and Engineering*. 2017. Vol. 25 (2). 279–308. https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1160396.
7. Jun K.S., Kang J.W., Lee K.S. Simultaneous estimation of model parameters and diffuse pollution sources for river water quality modeling. *Water Science and Technology*. 2007. Vol. 56 (1). 155–162. https://doi.org/10.2166/wst.2007.447.
8. Chaikovskii D., Zhang Y. Convergence analysis for forward and inverse problems in singularly perturbed time-dependent reaction-advection-diffusion equations. *Journal of Computational Physics.* 2002. Vol. 470. 111609. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111609.
9. Lukyanenko D.V., Shishlenin M.A., Volkov V.T. Solving of the coefficient inverse problems for a nonlinear singularly perturbed reaction-diffusion-advection equation with the final time data. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2018. Vol. 54. 233–247. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.06.002**.**
10. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V. Semi-empirical method for calculating diffuse runoff of conservative pollutants in small rivers: Communication 1. Method for reconstructing the total mass flow rate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 1. P. 5–23. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-1-5-23.
11. Filimonov V.Yu., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Calculation of dissolved pollutants mass flow according to the data of their concentration spatial distribution in the sites of small plaint rivers. *Eurasian journal of mathematical and computer applications*. 2023. Vol. 11 (4). 14–28. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2023-11-4-14-28.
12. Filimonov V.Y., Zinoviev A.T., Lovtskaya O.V. Method for estimating the pollutant flow rate under diffuse pollution of small lowland rivers. *Mathematics and computers in simulation.* 2021. Vol. 182 (9). 807–818. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.12.003**.**
13. Chueh Y.-Y., Fan C., Huang Y.-Z. Copper concentration simulation in a river by SWATWASP integration and its application to assessing the impacts of climate change and various remediation strategies. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 279. 111613. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111613.
14. Liu Q., Cheng Y., Fan C. Pollution characteristics and health exposure risks of heavy metals in river water affected by human activities. *Sustainability*. 2023. Vol. 15 (10). 8389. https://doi.org/10.3390/su15108389.
15. Byrne P., Onnis P., Runkel R.L., Frau I., Lynch S.F.L., Edwards P. Critical shifts in trace metal transport and remediation performance under future low river flows. *Environmental Science & Technology*. 2020. Vol. 54 (24). 15742–15750. https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04016
16. Ren J, Hao J, Tao L. Concentrations, spatial distribution, and pollution assessment of heavy metals in surficial sediments from upstream of Yellow River, China. *Environmental science and pollution research*. 2021. Vol. 28. 2904–2913. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10349-3.
17. Hoang H.G., Lin C., Tran H., Chiang C.F., Bui X.T., Cheruiyot N.K., Shern C.C., Lee C.W. Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 20. 101043. https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101043.
18. Lu Q., Bian Z., Tsuchiya N. Assessment of heavy metal pollution and ecological risk in river water and sediments in a historically metal mined watershed, Northeast Japan. *Environmental monitoring and assessment.* 2021. Vol. 193 (12). 814. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09601-1.
19. Markich S.J., Brown P.L. Relative importance of natural and anthropogenic influences on the fresh surface water chemistry of the Hawkesbury Nepean River, south-eastern Australia. *Science of the total environment.* 1998. Vol 217 (3). 201–230. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(98)00188-0.

20. Filimonov V.Y., Lovtskaya O.V., Zinoviev A.T. Diffuse pollution on small rivers. Features of distribution of dissolved pollutant concentrations. 2021. *Eurasian journal of mathematical and computer applications*. 2021. Vol. 9 (3). 39–52. https://doi.org/10.32523/2306-6172-2021-9-3-39-52.
21. Draper N.R., Smith H. Applied Regression Analysis: Wiley, New York, 1998. 736 p.

Сведения об авторах:

Филимонов Валерий Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0003-0229-7058; e-mail: vyfilimonov@rambler.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

About the authors:

Valery Y. Filimonov, Doctor of Physical/Mathematical Sciences, Chief Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Altai Kray, Russia; https://orcid.org/0000-0003-0229-7058; e-mail: vyfilimonov@rambler.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IWEP SB RAS), 1, Molodezhnaya St., 656038 Barnaul, Russian Federation; https://orcid.org/0000-0002-3942-1350, e-mail: lov@iwep.ru

Поступила в редакцию / Received 25.10.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 04.11.2024.
Принята к публикации / Accepted 13.03.2025.

УДК 556.1; 556.013 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39*

Влияние климатических изменений на влажность почвы

С.А. Лавров ✉

✉ sergey_lavrov_50@mail.ru

Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Влажность почв является важнейшей гидрофизической характеристикой при описании и расчетах инфильтрационных потерь дождевого и весеннего стока, испарения. Динамика увлажнения почв неразрывно связана с изменением климатических характеристик, одновременно влажность является значимым компонентом климата, поскольку она определяет исходящие конвективные потоки тепла и влаги с поверхности суши в атмосферу, формирующие климат планеты. **Методы.** Для анализа закономерностей изменения влажности почв под воздействием климатических изменений использованы многолетние наблюдения за влагообменом на воднобалансовых станциях России, а также физически обоснованная математическая модель вертикального тепло-влагопереноса. Проведены численные эксперименты по оценке влияния всех основных метеофакторов, обусловливающих динамику изменения влажности за период 1952–2019 гг. **Результаты.** В ходе анализа экспериментальных данных установлено, что в период 1960–1990 гг. наблюдался повсеместный рост влажности почв на европейской части России как в летний, так и в осенний сезоны. В последующем, вплоть до настоящего времени, положительные тренды изменчивости влагозапасов сменились отрицательными или их величина значительно упала.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: влажность почвы, климатические изменения, метеофакторы, данные наблюдений, математическое моделирование.

Для цитирования: Лавров С.А. Влияние климатических изменений на влажность почвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 19–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39, EDN: WDLJOS

The effect of climate change on soil moisture

Sergey A. Lavrov ✉

✉ sergey_lavrov_50@mail.ru

State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia

ABSTRACT

Relevance. Soil moisture is the most important hydro/physical characteristic in the description and calculation of infiltration losses of rain and spring runoff, evaporation. The dynamics of soil moisture is associated with changes in climatic characteristics, and at the same time humidity is a significant climatic component, since it determines the outgoing convective flows of heat and moisture from the land surface into the atmosphere, forming the climate of the planet. **Methods.** We used the Russia water balance stations many-year observation data to reveal regularities of the soil moisture change under the climate change impact, as well as the physically-grounded mathematical model of vertical heat/moisture/

© Лавров С.А., 2025

transfer. We have conducted digital experiments on assessment of the impact of all main meteo/factors that influence on the moisture changing dynamics over the 1952–2019 period. **Results.** From the analysis of experimental data, it follows that in the period from the 1960s to the 1990s, there was a widespread increase in soil moisture in the European part of Russia, both in the summer and autumn seasons. In the subsequent period, and up to the present, the positive trends in the variability of moisture reserves have been replaced by negative ones, or their value has dropped significantly.

KEYWORDS: soil moisture, climatic changes, meteorological factors, observational data, mathematical modeling.

For citation: Lavrov S.A. The effect of climate change on soil moisture. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2025. No. 2. P. 19–39. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-19-39, EDN: WDLJOS

ВВЕДЕНИЕ

Влажность почвы влияет практически на все компоненты водного баланса. Увлажнение почв в значительной степени определяет инфильтрационную составляющую дождевых паводков, стока весеннего половодья, а также нисходящие потоки влаги, формирующие подземную часть стока. От влажности зависят многие характеристики тепло- и влагообмена между поверхностью суши и атмосферой. Изменение влажности приводит к изменению водно-физических и тепловых свойств почв. В свою очередь, данные характеристики определяют процесс испарения [1]. В исследовании [2] на основе наблюдений глобальной сети мониторинга FLUXNET за испарением, основанных на методе вихревой ковариации и спутниковой информации о влажности почв, обнаружена сильнейшая взаимосвязь между трендами падения влажности поверхностных слоев почв за 1998–2008 гг. и тенденциями уменьшения эвапотранспирации за тот же период во многих регионах земного шара.

В классической работе А.А Роде [3] по гидрологии почв показано, что водный режим почв неразрывно связан с климатом. Одновременно влажность почвы – важнейший климатический компонент, поскольку она в значительной степени определяет исходящие конвективные потоки тепла и влаги в атмосферу и, соответственно, температуру поверхности суши [1]. Эти воздействия могут повлиять на вертикальную структуру пограничного слоя и его термодинамику, а в конечном итоге – на облачный покров, влажность воздуха и осадки. Многочисленные исследования продемонстрировали подобное воздействие как при моделировании, так и в наблюдениях. Подробный обзор результатов исследований о роли влажности почвы для климатической системы представлен в работе [4].

При этом в ряде публикаций отмечается, что влажность оказывает долговременное воздействие на климатическую систему. Так, в исследовании [5] установлена значительная корреляция между весенним увлажнением почвы в центрально-восточном Китае и повышенными летними температурами в северо-восточном Китае. В работе [6] количественно оценено влияние изменений климата и условий увлажнения почвы на сильную жару 2010 г. на западе России. Доказано, что в этот засушливый год одна только влажность почвы

увеличила риск сильной жары на западе России в шесть раз, в то время как изменение климата с 1960 по 2000 год увеличило его примерно втрое.

Учитывая значимость проблемы, связь влажности почвы и климата была проанализирована в рамках многочисленных исследований программ CMIP5, CMIP6 [7–9]. Предпринята попытка определить регионы, где влажность почвы особенно явно влияет на атмосферные условия и, в свою очередь, на климат.

Влажность почвы является основным источником природных водных ресурсов для сельского хозяйства и естественной растительности. Изменение климата может оказать значительное воздействие на многие виды деятельности человека, особенно – на сельское хозяйство. Поэтому большое внимание уделяется исследованию отрицательных тенденций в изменении влажности почв, поскольку их выявление является косвенным признаком возникновения засух на региональном, а возможно, и на глобальном уровне [10, 11].

С учетом тесных прямых и обратных связей влажности с различными климатическими характеристиками исследования по оценке влияния климатических изменений на увлажненность почв различных территорий приобретают довольно сложный научный характер, и одновременно они весьма актуальны.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многочисленные методы определения влажности почвы делятся на две группы: прямые и косвенные. Основным прямым методом является термостатно-весовой. К косвенным методам относятся радиометрический, электрометрический, тензиометрический, фоторефлектометрический и т. д. Детальный обзор методов измерения влажности почв можно найти в работах [12–14].

Традиционно измерения влажности почвы проводятся методом отбора проб с последующим лабораторным анализом или с помощью специальных датчиков и приборов (влагомеров). Натурные наблюдения позволяют проводить довольно точные измерения на различных глубинах. Однако каждая сеть измерений может использовать различные приборы и методы их калибровки. При этом пространственный и временной охват натурных наблюдений зачастую ограничен. Эти факторы усложняют использование данных о влажности почвы на месте (insitu) для региональных и глобальных обобщений. Чтобы решить эти проблемы и повысить эффективность данных измерений, в 2010 г. была создана Международная сеть мониторинга влажности почвы (ISMN), которая собирает данные по этому показателю с более чем 1 400 станций по всему миру и обеспечивает контролируемые по качеству данные о влажности [15].

Измерения на месте обеспечивают высокую точность определения влажности, но они зачастую неприменимы для больших и труднодоступных территорий. В этом случае целесообразно использовать дистанционные методы, прежде всего, – на основе спутникового зондирования Земли. В настоящее время существует довольно большое количество методов и систем космического зондирования, которые являются чрезвычайно мощным и важным средством для определения характеристик и мониторинга крупномасштабных свойств почвы и процессов, протекающих в ее приповерхностных

слоях [16–19]. В первую очередь необходимо упомянуть миссию Европейского космического агентства (ЕКА) по определению влажности почвы и солености океана (SMOS), работающую с 2009 г. Данная миссия, а также запуск в 2015 г. спутника НАСА с активно-пассивной системой измерения влажности (SMAP), способствовали созданию новых исследовательских сетей. Следует также отметить Российский гидрометеорологический спутник «Метеор-М» № 2, оборудованный радиометром МТВЗА-ГЯ. Средства спутникового мониторинга влажности почвы и источники полученных данных подробно описаны в статьях [18, 20].

Существенная разница между точечным характером наземных определений влажности почвы и пространственным разрешением спутников (обычно > 100 км^2) создает серьезную проблему для проверки достоверности дистанционных наблюдений. Исследования показали, что полученные со спутников данные о влажности почвы [21] могут точно отражать годовой цикл ее изменчивости. Однако влажность, измеренная различными спутниковыми системами, варьирует как географически, так и от системы к системе получения данных [22, 23]. Однако в отдельных работах указывается на удовлетворительный характер сходимости результатов измерения влажности наземными и дистанционными методами [24]. Сопоставления показали, что среднее расхождение в показаниях составляют около 0,04 объемной доли.

Активно-пассивные спутники для определения влажности почвы в настоящее время являются широко распространенным средством картографирования глобального распределения данной характеристики в поверхностных слоях Земли. Тем не менее на заросших растительностью территориях или в районах с высокими радиочастотными помехами обнаружение микроволнового сигнала является ненадежным. К тому же одним из основных ограничений спутниковых подходов является то, что они, как правило, могут измерять содержание воды только в нескольких верхних сантиметрах почвы, на глубине примерно 0–10 см [25]. Для получения значений влажности более глубоких слоев почвы, особенно в зоне корневой системы сельскохозяйственных культур, до глубины примерно 200 см, предложены многочисленные методы, основанные на инверсии материалов дистанционного зондирования. В статье [26] анализируются и обобщаются методы расчета и оценки влажности в корневой системе по данным спутниковой информации в поверхностном слое почвы. За последние десятилетия разработан целый ряд подобных методов, которые можно разделить на четыре категории: эмпирические, полуэмпирические, основанные на физике процесса и методы машинного обучения.

Чтобы исключить обозначенные выше проблемы, для исследования распределения поверхностных и грунтовых вод стал активно использоваться метод измерения вариаций гравитационного поля Земли спутниковыми системами GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) и GRACE-FO [27–29]. Установлено, что значения влажности, полученные на основе GRACE, находятся в приемлемом согласии с данными измерений на месте, а также тесно коррелирует с результатами SMAP, особенно во влажных регионах [30].

Кроме результатов измерения на месте и спутникового зондирования, моделирование становится третьим важнейшим источником информации о влажности почв. За прошедшие годы разработано множество методов для расчета динамики почвенной влаги, начиная от простых и заканчивая сложными физически обоснованными детерминированными моделями. Для построения простых бюджетных моделей требуются только данные доступной водоудерживающей способности почв и значения потенциального испарения. Однако для выполнения расчетов с использованием подробных детерминированных моделей, основанных на уравнении Ричардса, как правило, необходимы ежедневные или почасовые метеорологические данные, а также функции гидравлической проводимости и водного потенциала для различных слоев почвы [31].

Спектр используемых в настоящее время в климатическом моделировании методов расчета влажности распространяется от очень простых однослойных моделей до сложных схем с несколькими слоями, распределением свойств почвы по вертикали, а также подробным описанием биофизических процессов растений и их взаимодействия с почвой [32]. В таких обстоятельствах возникает законный вопрос о точности воспроизведения различными моделями текущих и прогнозируемых значений влажности почвы. В рамках Второго глобального проекта по определению влажности почвы (Global Soil Wetness Project (GSWP-2)) за десятилетний период (1986–1995 гг.) сравнили 11 моделей поверхности суши и обнаружили, что, хотя модели довольно успешно воспроизводят аномалии влажности, они могут иметь значительные погрешности и не позволяют точно определять абсолютное содержание влаги в почве [33].

В работе [34] представлены всесторонние исследования по оценке результатов моделирования влажности почвы с 2003 по 2012 г., проведенного в рамках проекта Coupled Model Intercom-parison (CMIP5). Результаты моделирования с использованием 17 моделей CMIP5 для слоя почвы 0–10 см и 14 моделей для слоя 0–100 см были сопоставлены с локальными и спутниковыми данными, полученными для территории США. Сравнения показали, что модельный ансамбль CMIP5 воспроизводит ежемесячные данные о влажности почвы за теплый сезон (с апреля по сентябрь) с довольно высокой степенью точности относительно полученным insitu. Коэффициент корреляции (R) при сравнении результатов расчета с измеренными для слоя почвы 0–100 см равен 0,91, а для слоя 0–10 см R = 0,92. При сравнении расчетов со спутниковыми данными для слоя почвы 0–10 см коэффициент корреляции гораздо ниже и равен 0,65. В представленном исследовании также отмечено, что существует значительная вариабельность в характеристиках влажности отдельных моделей, при этом самая большая неопределенность выявлена в поверхностном слое почвы 0–10 см. Однако среднее значение многомодельного CMIP5 в целом позволяет получить правильную картину пространственного распределения влажности почвы и ее динамики во времени.

Признавая, что проекты CMIP являются мощным ресурсом для изучения климатической системы и прогнозирования будущих изменений климата, тем не менее необходимо констатировать, что используемые в них модели содержат многочисленные систематические погрешности и неопределенности [35].

Это особенно верно для наземной гидрологии, включая моделирование влажности почвы. Несмотря на то, что модели могут воспроизводить достаточно точно сезонную изменчивость влажности почвы, результаты моделирования демонстрируют значительные региональные различия [34]. Чтобы облегчить использование более передовых моделей в будущих прогнозах, в настоящее время всесторонняя оценка точности воспроизводства глобальной влажности почвы проводится в рамках моделирования CMIP6 [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наиболее массовые наблюдения за влажностью почвы в России (а ранее в СССР) проводятся на сети агрометеорологических станций, которая на Европейской территории России (ЕТР) начала формироваться с начала 1950-х годов.

Чтобы исключить влияние пестроты почвенного покрова, используется так называемая продуктивная влага, т. е. количество влаги, превышающее влажность устойчивого завядания растений (ВЗ). Для получения региональных оценок данные отдельных станций осреднены с учетом типов почв и их механического состава в соответствии с рекомендациями работ [36, 37].

В табл. 1 приведены значения продуктивных влагозапасов метрового слоя в различных природных зонах бассейна р. Волги.

Таблица 1. Средние продуктивные влагозапасы в различных природных зонах бассейна р. Волги
Table 1. Average productive moisture reserves in different nature zones of the Volga River basin

Природная зона	Месяц		
	апрель – май (мм)	июнь – август (мм)	сентябрь – ноябрь (мм)
Тайга	201	145	185
Смешанные леса	194	134	174
Широколиственные леса	156	108	140
Лесостепь	174	120	155
Типичные степи	136	73	108
Сухие степи	90	51	61

Влажность почвы изменяется в широких пределах как в пространстве, так и во времени. В засушливые годы в верхнем полуметровом слое она может снижаться до значений влажности завядания. Однако в отдельные годы влажность может вырасти до значений наименьшей влагоемкости (НВ). Амплитуда колебаний влагозапасов метрового слоя почвы может достигать 120–150 мм [36, 37].

На рис. 1 показана внутригодовая динамика общих влагозапасов на водно-балансовой станции (ВБС) Подмосковная (1967 г., участок 4) для слоев почвы 0–10 см, 0–20, 0–50 и 0–100 см. Хорошо прослеживаются общие закономерности изменения влажности почвы в течение года: ее рост во время и после снеготаяния, падение в летний период, обусловленное испарением влаги, и увеличение осенью, вызванное ростом количества осадков.

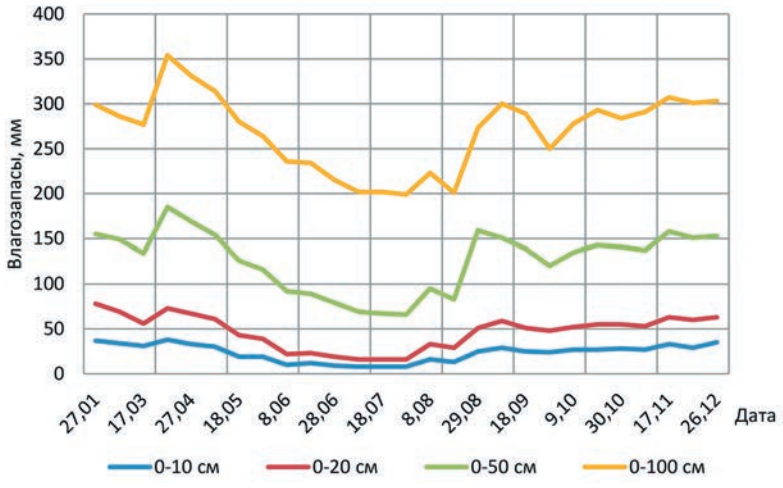


Рис. 1. Внутригодовая динамика влагозапасов в слоях почвы 0–10 см, 0–20 см, 0–50 см и 0–100 см, Подмосковная ВБС, 1967 г.
Fig. 1. Within-year moisture reserves dynamics in the ground layers: 0–10 cm, 0–20 cm, 0–50 cm and 0–100 cm, Podmoskovnaya water balance station (WBS), 1967.

Для изучения временных и пространственных масштабов изменения влажности почвы до 2000 г. в работе [38] был использован банк данных наблюдений в разных климатических зонах мира и странах, включая бывший Советский Союз, Китай, Монголию, Индию и Соединенные Штаты. В той же работе показано, что летняя влажность почвы в слое 1 м увеличивалась в период 1960–1990 гг. на большинстве из 600 наблюдательных станций. Например, тренд роста влажности для Валдая составил 1 мм / 10 лет на лугах и 3 мм / 10 лет в лесу. Результаты наблюдений на ВБС Каменная степь показали, что на территориях с травяной растительностью тренд влажности составил 3,1 мм / 10 лет. На монгольских пастбищах влажность росла со скоростью 2,5 мм / 10 лет, а в штате Иллинойс (США) со скоростью 1,9 мм / 10 лет.

Исторические ряды данных о содержании влаги в почве, измеренные insitu, доступны лишь для нескольких регионов и часто являются очень короткими [38]. Редкий 45-летний ряд влажности почвы в сельскохозяйственных районах Украины представлен в работе [39]. Были сопоставлены данные за два периода – 1958–1979 гг. и 1980–2002 гг. – и проанализированы значения трендов влажности и метеоэлементов, а также рассчитаны корреляционные связи между всеми переменными. В табл. 2 приведены результаты анализа, полученные в работе [39].

Как следует из представленных данных, рост влажности почвы в период 1958–1979 гг. сменился ее падением в 1980–2002 гг. В те же периоды сменился и тренд температуры – с отрицательного на положительный (табл. 2).

В исследовании [40] изучены глобальные тенденции содержания влаги в почвах (soil moisture content (SMC)) на разных глубинах в период 2000–2020 гг. (в статье дан прогноз до 2090 г.). В этой работе использована глобальная система ассимиляции наземных данных НАСА GLDAS-NOAH025, а также информация об осадках и температуре из 15 моделей CMIP6. Обнаружено, что, по

Таблица 2. Линейные тренды летней влажности почвы (*W*), осадков (*x*) и температуры воздуха (*T*) и коэффициенты корреляции (*W, x*), (*W, T*) и (*x, T*) [39]
Table 2. Linear trends of the summer soil moisture (*W*), precipitates (*x*), air temperature (*T*), and correlation coefficients (*W, x*), (*W,* T*)* and (*x,* T*)* [39]

Линейный тренд	Период		
	1958–1979 гг.	1980–2002 гг.	1958–2002 гг.
Тренд *W* – озимые злаки, см / 10 лет	0,91	-0,22	0,72
Тренд *W* – яровые злаки, см / 10 лет	0,89	-0,32	0,64
Тренд *x*, мм / 10 лет	4,36	-5,52	-0,31
Тренд *T*, °C / 10 лет	-0,45	0,78	0,15
Коэффициент корреляции (*W, x*)	0,58	0,56	0,48
Коэффициент корреляции (*W, T*)	-0,50	-0,25	-0,22
Коэффициент корреляции (*x, T*)	-0,58	-0,37	-0,46

сравнению с многолетней средней влажностью за последние 70 лет, в период 2000–2020 гг. глобальный SMC в слое почвы 0–200 см уменьшается со скоростью 1,284 кг/м^2 в год на площади, составляющей 31,67 % от общемировой. А за период 2010–2020 гг. скорость снижения SMC в слое 0–200 см составила 2,251 кг/м^2, т. е. удвоилась. По мнению авторов, глобальное потепление и уменьшение количества осадков являются основными причинами уменьшения SMC на разных глубинах в период с 2000 по 2020 г. Согласно данному исследованию, влажность почвы продолжит снижаться и в будущем на площади 22,73–49,71 % от общемировой. Однако наблюдаются региональные различия.

В работе [41] исследовано влияние изменения климата на поверхностный сток и влажность почвы в районе истоков р. Хуанхэ, гидрологическая модель SWAT была объединена с моделями CMIP. Прогноз поверхностного стока и влажности почвы в бассейне р. Хуанхэ проанализированы с помощью модели линейной регрессии. Динамика поверхностного стока и среднегодовой температуры в районе истоков р. Хуанхэ с 2011 по 2022 г. показала общую тенденцию к увеличению, а влажность почвы – к снижению. Согласно трем климатическим сценариям CMIP5 (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5), количество осадков увеличивается, но влажность почвы уменьшается, что может быть объяснено большей интенсивностью испарения, чем осадков.

В рамках программы CMIP5 [42] выполнены средние многомодельные прогнозы (использовано 25 моделей) изменения среднегодовой поверхностной и общей влажности почвы (до 200 см) на 2070–2099 гг. по сравнению с 1976–2005 гг. Результаты расчетов для поверхностных слоев почв характеризуются широкомасштабным уменьшением влажности на большей части территории Северной Америки, Южной Америки, Европы, Центральной Азии, Ближнего Востока, Южной Африки и Австралия. В целом на 70 % поверхности суши (за исключением Гренландии и Антарктиды) наблюдаются отрицательные изменения. Прогнозы отрицательных изменений общей влажности почвы, напротив, менее масштабны: подобная динамика отмечается на 57 % поверхности Земли.

В ходе представленной работы проанализированы и обобщены данные наблюдений за влажностью почвы, испарением с суши, температурой и осадками на воднобалансовых станциях Подмосковная, Нижнедевицкая и Каменная степь. На рис. 2 показана многолетняя динамика влажности на этих станциях. В табл. 3 приведены рассчитанные тренды изменения влагозапасов, испарения, осадков и температуры воздуха за два периода: 1960–1990 гг. и 1991–2018 гг. и два сезона – летнего (июнь – август) и осеннего (сентябрь – ноябрь).

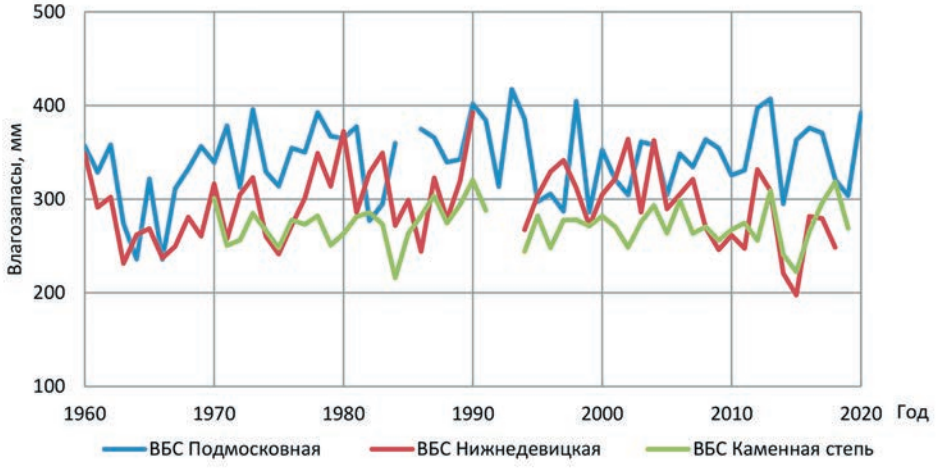


Рис. 2. Динамика общих влагозапасов в метровом слое на экспериментальных площадках воднобалансовых станций Подмосковная, Нижнедевицкая и Каменная степь.
Fig. 2. Dynamics of general moisture reserves in the one-meter layer at the experimental sites of Podmoskovnaya, Nizhnedevitskaya and Kamennaya Step WBSs.

Из анализа экспериментальных данных рис. 2 и табл. 3, а также работ [38, 39] следует, что в период 1960 –1990 гг. наблюдается повсеместный рост влажности почв на Европейской территории России как в летний, так и в осенний сезоны. В последующий период, неохваченный работами [38, 39], и вплоть до настоящего времени положительные тренды изменчивости влагозапасов сменились отрицательными или их величина значительно упала. Сравнительный анализ трендов влагозапасов и метеорологических факторов показывает, что росту влажности в период 1960–1990 гг. способствовали: с одной стороны, увеличение осадков, с другой – отсутствие роста температуры воздуха (табл. 3). В последующее время в большинстве случаев отрицательный тренд температуры сменился положительным, а количество осадков стало снижаться, что привело к уменьшению влагозапасов.

Самые высокие коэффициенты корреляции между влагозапасами и метеоэлементами отмечаются именно для осадков, немногим ниже – для температуры в летний сезон. Осенью влияние температуры сказывается меньше ввиду падения величины испарения. Зависимость между осадками и температурой носит обратный характер. Коэффициенты корреляции относительно малы, но по абсолютным величинам они выше в летнем сезоне, чем в осеннем.

Таблица 3. Линейные тренды влажности почвы (W), осадков (x), температуры воздуха (T), испарения с суши (E_S) и коэффициенты корреляции (W, x), (W, T) и (x, T)
Table 3. Linear trades of soil moisture (W), precipitates (x), air temperature (T), evaporation from the ground (E_S), and correlation coefficients (W, x), (W, T) and (x, T)

Статистическая характеристика	Сезон	Подмосковная		Нижнедевицкая		Каменная степь	
		1960–1990 гг.	1991–2018 гг.	1960–1990 гг.	1991–2018 гг.	1960–1990 гг.	1991–2018 гг.
Тренд W, мм/год	лето	1,37	0,28	0,62	-1,88	1,43	-0,25
	осень	1,85	0,08	1,67	-2,80	1,08	0,34
Тренд x, мм/год	лето	0,63	0,29	1,07	-0,14	0,30	-0,16
	осень	0,49	-0,31	1,61	-1,38	1,07	-0,41
Тренд T, °С/год	лето	-0,01	0,05	-0,03	0,05	-0,02	0,08
	осень	-0,01	0,09	-0,03	0,07	-0,03	0,06
Тренд E_S, мм/год	лето	0,43	–	0.82	0,05	0,14	-0,51
	осень	-0,02	–	0,10	-0,03	-0,07	-0,02
Корреляция (W, x)	лето	0,73	0,79	0,54	0,67	0,60	0,30
	осень	0,46	0,32	0,66	0,75	0,37	0,54
Корреляция (W, T)	лето	-0,53	-0,55	-0,56	-0,72	-0,56	-0,32
	осень	-0,33	-0,13	-0,23	-0,20	-0,23	-0,10
Корреляция (x, T)	лето	-0,31	-0,28	-0,54	-0,47	-0,33	-0,48
	осень	0,06	-0,04	-0,22	-0,23	-0,22	-0,19

Из анализа результатов табл. 3 следует, что направленность изменения трендов влажности почвы и испарения совпадают. Особенно это заметно для летних месяцев. Синхронность наблюдается при росте испарения и влажности в период 1960–1990 гг. и их одновременном падении в 1991–2018 гг. Полученные данные позволяют присоединиться к выводам работы [2], в которой на основе данных глобальной сети мониторинга испарения и влажности обнаружена значительная связь между тенденциями падения этих характеристик в период 1998–2008 гг. Отметим, что коэффициенты корреляции между многолетними рядами данных испарения и влажности почв для анализируемых станций довольно низкие, как правило, менее 0,3, что объясняется исключительно сложной взаимообусловленностью и многофакторностью формирования этих характеристик. Из простейшего анализа следует, что при росте испарения влажность почв должна уменьшаться, а полученные выше результаты свидетельствуют об обратном, т. е. в реальных условиях тенденции изменения испарения в большей степени зависят от динамики влажности, чем тенденции влажности от испарения. И это еще раз указывает на высокую значимость увлажнения почв при расчетах и прогнозах испарения с поверхности суши.

Исходя из физически обоснованных закономерностей формирования влагозапасов в почве следует, что основными метеофакторами при этом являются осадки и температура воздуха. Используя данную концепцию,

О.Д. Сиротенко и соавторы в работах [43–46] предлагают схему мониторинга динамики влагозапасов почвы для 29 регионов территории бассейна Волги. Метод позволяет решать задачи оценки влияния произошедших изменений климата на показатели увлажненности территорий и давать прогноз влияния ожидаемых изменений климата, рассчитанных по современным моделям глобальной циркуляции атмосферы и океана. Для расчета средних за k-й месяц значений запасов влаги (Wp_k) для теплого периода года (апрель – октябрь) используются рекуррентные уравнения вида:

$$Wp_k = a_k Wp_{k-1} + b_k T_k + c_k (R_{k-1} + R_k) + d_k, \quad (1)$$

где a_k, b_k, c_k, d_k – индивидуальные для каждого субъекта РФ эмпирические коэффициенты по месяцам;

T_k – среднемесячная температура воздуха за k-й месяц;

R_k – сумма осадков за k-й месяц.

В рекомендациях [47] приведены коэффициенты уравнения (1) и примеры расчета влагозапасов на основе данных о среднемесячных значениях температуры и осадков. В табл. 4 помещены данные о трендах влагозапасов за осенний сезон для периодов 1960–1990 гг. и 1991–2018 гг., рассчитанные по метеоданным ряда пунктов в бассейне Волги. На всех анализируемых территориях в период 1960–1990 гг. наблюдался рост влагозапасов, а в последующий период – их падение. Анализ влияния осадков и температуры на показатели трендов, выполненный для воднобалансовых станций, очевидно, пригоден и для всего Волжского бассейна.

Таблица 4. Линейные тренды влагозапасов в метровом слое почвы для ряда пунктов в бассейне Волги, мм/год

Table 4. Linear trends of moisture reserves in a soil one-meter layer for a number of points in the Volga River basin, mm/year

Пункт	1960–1990 гг.	1991–2018 гг.	Пункт	1960–1990 гг.	1991–2018 гг.
Астрахань	0.10	-0.23	Самара	0.81	-0.22
Тамбов	0.25	-1.16	Киров	0.52	-0.89
Москва	0.37	-0.94	Нижний Новгород	0.74	-0.92
Ивдель	0.25	-0.69	Чердынь	0.76	-0.40
Ершов	1.02	-1.25	Уфа	0.77	-0.56

Как видим, довольно простой метод оценки влияния климатических изменений на почвенные влагозапасы, предложенный О.Д. Сиротенко и др. [46], дает те же закономерности изменения влажности, что и полученные в работах [38, 39] и в результате нашего анализа экспериментальных данных на ВБС (табл. 3).

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОФАКТОРОВ НА ВЛАЖНОСТЬ ПОЧВЫ

Для оценки воздействия динамики метеофакторов на влажность почвы использована авторская математическая модель, представленная в работах [1, 48]. На основе результатов численных экспериментов выполнена оценка

чувствительности расчетной величины влажности к изменению таких метеорологических характеристик, как температура воздуха (T_2), давление водяного пара в атмосфере (e_2) и скорость ветра (u_2) на высоте 2 м, а также потока солнечной радиации (R_S) и осадков (x). В табл. 5 представлены результаты расчетов по оценке влияния вышеназванных метеоэлементов на среднюю влажность метрового слоя почвы в предзимний период.

Таблица 5. Средние относительные изменения многолетних величин влажности в метровом слое почвы (δ, %) при росте численных значений метеоэлементов на 1 %, где u_2, e_2, T_2 – скорость ветра, давление пара и температура воздуха на высоте 2 м от поверхности почвы, R_S – поток солнечной радиации, x – осадки

Table 5. Average relative changes of many-year values of moisture in a soil one-meter layer (δ, %) with 1 % increase of the meteo/elements numerical values, where u_2, e_2, T_2 are wind velocity, vapor pressure and air temperature at 2 meters height from the soil surface, R_S is solar radiation flow, and x is precipitates

Станция	u_2, м/с	e_2, мбар	T_2, ^{0}C	R_S, вт/(см^2•^{0}C)	x, мм
ВБС Подмосковная	-0,06	0,26	-0,15	-0,15	0,10
ВБС Нижнедевицкая	-0,02	0,23	-0,13	-0,08	0,06

Данные табл. 5 являются средними значениями относительных изменений многолетних величин влажности почвы при росте численных значений метеоэлементов на 1 % (δ, %).

$$\delta = 100\ (W_1 - W)\ /\ W, \qquad (2)$$

где W – влажность при естественной изменчивости метеоэлементов;

W_1 – влажность при росте численных значений метеоэлементов на 1 %.

Результаты расчета сопоставимы с аналогичными, полученными для процесса испарения с суши [1], только знаки у численных значений противоположны. Это объясняется тем, что с ростом испарения влажность почвы уменьшается. Закономерности влияния метеофакторов на влажность почвы в значительной степени определяются закономерностями их влияния на испарение. С ростом скорости ветра, температуры почвы и потока солнечной радиации испарение растет и, соответственно, влажность падает. Рост упругости водяного пара в атмосфере приводит к уменьшению испарения, а значит, и к увеличению влажности. Осадки влияют на влажность почвы неоднозначно: с одной стороны, рост величины осадков напрямую увеличивает почвенные влагозапасы, с другой – при росте осадков увеличивается испарение, а это приводит к уменьшению влажности. Таким образом, роль осадков носит комплексный характер и обусловлена не только их изменчивостью, но и вариациями всех остальных метеоэлементов. Также велико влияние на влажность почвы интенсивности выпадения осадков и их распределения в течение года.

В исследовании для Средиземноморья [11] на 10 участках, расположенных на юге Франции, показано, что чувствительность влажности почвы к изменениям количества осадков и температуры на разных участках одинакова.

Однако при этом влажность почвы более чувствительна к периодичности осадков и количеству засушливых дней, чем к их интенсивности или повышению температуры. В целом отмечается, что изменения в количестве осадков и температуры оказывают большее влияние на влажность почвы при ее низких значениях, чем в условиях, близких к ее влагонасыщению.

Как следует их данных табл. 5, степень влияния различных метеофакторов на влажность отличается друг от друга незначительно. Нельзя утверждать, что единственными значимыми факторами являются осадки и температура, тренды которых мы преимущественно рассматривали выше. Чтобы изучить влияние трендов отдельных метеоэлементов на изменчивость влажности почвы, были проведены специальные численные эксперименты. При этом использовалась следующая методика исследований. При расчетах влажности за период 1953–2019 гг. исходная метеоинформация трансформировалась. Для исключения влияния трендов скорости ветра, температуры воздуха, осадков и давления пара, данные годовых рядов их показателей за расчетный период были заменены на значения метеопеременных для тех же дат первого расчетного года (1952 г.). Исключая таким образом в процессе моделирования тренды любых переменных, мы можем оценить влияние на тренд влажности каждого отдельного метеофактора или их любой совокупности. На рис. 3 приведены результаты расчетов динамики запасов влаги в метровом слое почвы для Подмосковной ВБС, в которых были исключены из рассмотрения все тренды метеоэлементов, кроме одного исследуемого. Для сравнения также используются расчеты с присутствием и отсутствием всех трендов.

Как следует из представленной информации, в период с 1952 г. до середины 1970-х годов сложную динамику изменчивости влажности почвы практически полностью определяет ход осадков. В последующий период начинает сказываться влияние и других факторов. Далее мы рассчитали величины трендов для всех зависимостей, приведенных на рис. 3, за период 1960–1990 гг.

В табл. 6 приведены значения трендов динамики влагозапасов с 1960 по 1990 г. при естественной изменчивости всех метеофакторов (*TRO*) и при изменчивости только одного из них.

Таблица 6. Значения трендов динамики влагозапасов за 1960–1990 гг. в метровом слое почвы при наличии трендов всех метеоэлементов, при наличии только тренда осадков, тренда температуры воздуха, давления пара и скорости ветра, мм/год

Table 6. Trend values of the water reserves dynamics for 1960–1990 in a soil one-meter layer with all meteo/elements trend, with only precipitates' trend, only air temperature trend, vapor pressure and wind velocity trends, mm/year

Станция	Наличие всех трендов	осадки	температура	пар	ветер
ВБС Подмосковная	1,3	0,6	0,2	0,1	0,2
ВБС Нижнедевицкая	0,23	0,1	0,15	-0,09	0,03

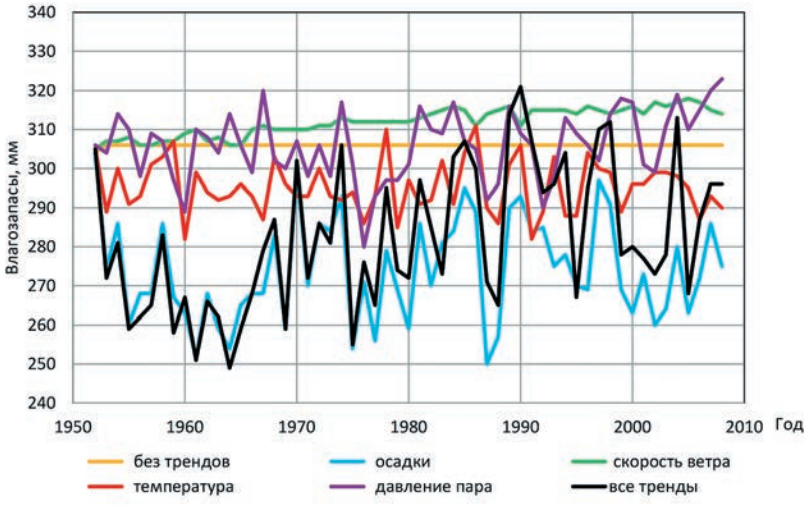


Рис. 3. Динамика влагозапасов в метровом слое почвы при отсутствии трендов метеоэлементов, при естественной изменчивости всех метеоэлементов и при изменчивости только одного из них: осадков, скорости ветра, температуры воздуха и давления водяного пара.
Fig. 3. Dynamics of moisture reserves in a one-meter soil layer in the absence of meteo/elements' trends, with natural variability of all meteo/elements, and with variability of only one of them: precipitates, wind velocity, air temperature and water vapor pressure.

В итоге следует отметить: несмотря на то, что тренды осадков и температуры являются определяющими в формировании тренда влагозапасов, на отдельных временных отрезках влияние наблюдаемых трендов других метеоэлементов может оказать заметное воздействие на динамику влажности. Например, вклад изменчивости скорости ветра для ст. Подмосковная сравним с вкладом тренда температуры воздуха (табл. 6). И это несмотря на более слабое индивидуальное влияние данного фактора на влажность (табл. 5). Объясняется это тем, что скорость ветра претерпела более значительные изменения на рассматриваемом отрезке времени, чем температура воздуха. Для ВБС Нижнедевицкая влияние ветра незначительно. Здесь решающими факторами формирования тренда влажности выступают температура и осадки. Расчеты также показали, что суммарный вклад трендов метеоэлементов, наблюдаемых в холодный период года, в общий тренд (*TRO*) составляет 10–15 %.

Выше в основном проанализирована динамика изменения влажности в теплый период года. Однако не менее значимое влияние на влагозапасы оказывают процессы зимнего периода, которые активно участвуют в перераспределении влаги под воздействием ее миграции к фронту промерзания. В работе И.Л. Калюжного и С.А. Лаврова [49] приведены многочисленные результаты экспериментальных и теоретических исследований по этой тематике. Показано, что с ростом скорости и глубины промерзания в зимний период увеличивается накопление влаги в мерзлой части почвенной колонки. Данный фактор важен при рассмотрении процессов формирования талого стока, т. к. он в значительной степени изменяет водопоглотительную способность почв. Показа-

тель, характеризующий динамику влажности почвы в холодный период года, тесно связан с динамикой глубины промерзания. При больших глубинах промерзания превалирует процесс зимней миграции, при низких – отток влаги в нижележащие слои почвы.

Исследования временной и пространственной изменчивости глубин промерзания на Европейской территории России указывают на значительное их падение в период с 1960 по 1990 г. Данное утверждение иллюстрирует график, отражающий динамику изменений зимних влагозапасов в метровом слое в период 1952–2019 гг. на Подмосковной ВБС (рис. 4).

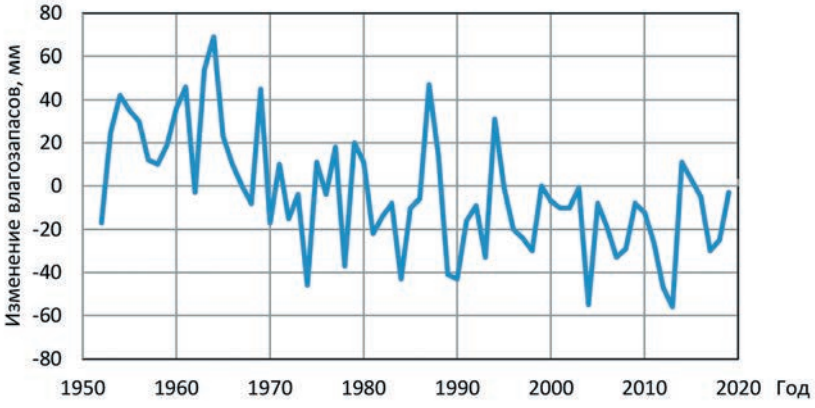


Рис. 4. Динамика изменения влагозапасов в метровом слое в течение зимнего периода на Подмосковной ВБС.
Fig. 4. Moisture reserves changes dynamics in a one-meter layer during the winter perio at Podmoskovnaya WBS.

ВЫВОДЫ

В работе впервые выполнены оценки изменения влажности почв под воздействием климатических изменений на Европейской территории России в период 1960–2020 гг. Новизна исследования обусловлена использованием совместного анализа данных наблюдений и результатов расчета по физически обоснованной математической модели. Отмечена хорошая сходимость полученных результатов.

Проведены оригинальные численные эксперименты по выявлению воздействия изменчивости отдельных метеофакторов на общие тенденции изменения влажности почв за анализируемый период. Показано взаимное влияние изменчивости всех метеорологических переменных на интегральный тренд динамики влажности почвы.

Из анализа экспериментальных данных следует, что в период 1960–1990 гг. наблюдался повсеместный рост влажности почв на европейской территории России как в летний, так и в осенний сезоны. В последующий период, вплоть до настоящего времени, положительные тренды изменчивости влагозапасов в теплый период года сменились отрицательными или их величина значительно упала.

Динамика влагозапасов в течение зимнего периода характеризуется их заметным уменьшением в верхнем слое почвы в период 1960–1990 гг. и стабилизацией их величины в последующий период.

Результаты модельных экспериментов указывают на то, что изменчивость осадков и температуры воздуха являются определяющими при формировании трендов влагозапасов. Однако на отдельных временных отрезках влияние других метеоэлементов, например скорости ветра, оказывает более значительное воздействие на динамику влажности почв.

Результаты проведенного исследования имеют большую практическую значимость для анализа изменчивости характеристик поверхностного стока, которая наблюдается в последние десятилетия. Дальнейшие перспективы изучения этого вопроса в основном связаны с расширением районов исследований в различных климатических зонах России и увеличением экспериментальной базы данных о влажности почвы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров С.А. Закономерности формирования испарения с поверхности суши и воды под влиянием климатических изменений // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 1.С. 4–23. https://orcid.org/ 10.35567/1999-4508-2019-1-1.
2. Jung, M. et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply // Nature. 2010. No. 467(7318). P. 951–954.
3. Роде А.А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 663 с.
4. Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B. and Teuling A.J. Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. // Earth-Science Review. 2010. No. 99. P. 125–161.
5. Zhang J., Yang Z., Wu L. and Yang K. Summer high temperature extremes over northeastern China predicted by spring soil moisture. // Scientific Report. 2019. No. 9. P. 1–12.
6. Hauser M., Orth R. and Seneviratne S.I. Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia // Geophysics Research Letters. 2016. No. 43. P. 2819–2826.
7. Hauser M., Orth R., Seneviratne S.I. Investigating soil moisture-climate interactions with prescribed soil moisture experiments: An assessment with the Community Earth System Model (version 1.2) // Geoscience Model Development. 2017. No. 10. P. 1665–1677.
8. Schwingshack C., Hirsch M., Seneviratne S. A theoretical approach to assess soil moisture–climate coupling across CMIP5 and GLACE-CMIP5 experiments // Earth System Dynamics. 2018. No. 9. P. 1217–1234.
9. Qiao L., Zuo Z., Xiao D. Evaluation of Soil Moisture in CMIP6 Simulations. // Journal of Climate. 1922.Vol. 35. P. 779–800.
10. Berg A. and Sheffield J. Climate change and drought: the soil moisture perspective // Current Climate Change Report. 2018. No. 4. P. 180–191.
11. Mimeau L., Tramblay Y., Brocca L., Massari C., Camici S., Finaud-Guyot P. Modeling the response of soil moisture to climate variability in the Mediterranean region // Earth Systems Science. 2021. No. 25. P. 653–669.
12. Dobriya P., Quresh A., Badola R., Hussain S.A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 458–459. No. 21. P. 110–117.

13. Lekshmi S.S.U., Singh D.N., Baghinic M.S. A critical review of soil moisture measurement // Measurement. 2014. Vol. 54. P. 92–105.
14. Rasheed M.W., Tang, J., Sarwa A., Shah S., Saddique N., Khan M.U., Imran K.M., Nawaz S., Shamshiri R.R., Aziz M. et al. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics. // A Comprehensive Review of Sustainability. 2022. No. 14. P. 1–13.
15. Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D., Schremmer L., Petrakovic I., Zappa L., Preimesberger W., Xaver A., Annor F., Ardö J., Baldocchi D., Bitelli M., Blöschl G., Bogena H., Brocca L., Calvet J.-C., Camarero J.J., Capello G., Choi M., Cosh M.C., van de Giesen N., Hajdu I., Ikonen J., Jensen K.H., Kanniah K.D., de Kat I., Kirchengast G., Kumar Rai P., Kyrouac J., Larson K., Liu S., Loew A., Moghaddam M., Martínez Fernández J., Mattar Bader C., Morbidelli R., Musial J.P., Osenga E., Palecki M.A., Pellarin T., Petropoulos G.P., Pfeil I., Powers J., Robock A., Rüdiger C., Rummel U., Strobel M., Su Z., Sullivan R., Tagesson T., Varlagin A., Vreugdenhil M., Walker J., Wen J., Wenger F., Wigneron J.P., Woods M., Yang K., Zeng Y., Zhang X., Zreda M., Dietrich S., Gruber A., van Oevelen P., Wagner W., Scipal K., Drusch M. and Sabia R. The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. // Hydrological Earth Systems Science. 2021. No. 25. P. 5749–5804.
16. Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Vereecken H. & Tuller M. Ground, Proximal and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture // Reviews of Geophysics. 2019. P. 530–616.
17. Rötzer K., Montzka C. and Vereecken H. Spatio-temporal variability of global soil moisture products // Journal of Hydrology. 2015. No. 522.P. 187–202.
18. Tavakol A., McDonough K.R., Vahid Rahmani V., Hutchinson S. The soil moisture data bank: The ground-based, model-based, and satellite-1 based soil moisture data // Remote Sensing Applications Society and Environment. 2021. No. 24 (11). P. 1–101.
19. Srivastava P.K. Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources // Water Resources Management. 2017. No. 31. P. 3161–3176.
20. Волчек А.А., Петров Д.О. Источники данных глобального мониторинга влажности почвы средствами дистанционного зондирования поверхности земли // Гидрометеорология и экология. 2021. № 1. С. 38–43.
21. Albergel C., Dorigo W., Balsamo G., Muñoz-Sabater J., de Rosnay P., Isaksen, L., Brocca L., de Jeu R. and Wagner W. Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface re-analyses // Remote Sensing of Environment. 2012. No. 138. P. 77–89.
22. Fang L., Hain C.R., Zhan X. and Anderson M.C. An inter-comparison of soil moisture data products from satellite remote sensing and surface model // International Journal of Applied Earth Observations. 2016. No. 48. P. 37–50.
23. Wanders N., Karssenberg D., Bierkens M., Parinussa R., de Jeu R., van Dam J. and de Jong S. Observation uncertainty of satellite soil moisture products determined with physically-based modeling // Remote Sensing of Environment. 2012. No. 127. P. 341–356.
24. Бородина И.А., Кижнер Л.И., Богословский Н.Н., Ерин С.И., Рудиков Д.С. Сравнение спутниковых данных измерений влажности почвы ASCAT с прямыми измерениями // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 380. С. 181–184.
25. Crow W.T., Berg A.A., Cosh M.H., Loew A., Mohanty B.P., Panciera R., de Rosnay P., Ryu D. and Walker J.P. Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products // Revue of Geophysics. 2012. No. 50. P. 1–12.
26. Li M., Sun H., Zhao R. A Review of Root Zone Soil Moisture Estimation Methods Based on Remote Sensing. // Remote Sensing. 2023. No. 15. P. 5361–5372.
27. Ткаченко Н.С., Лыгин И.В. Применение спутниковой миссии GRACE для решения геологических и географических задач // Вестник Московского университета. 2017. Сер. 4. Геология. № 2. С. 3–7.
28. Schmidt R. and Coauthors. GRACE observations of changes in continental water storage // Global Planetary Change. 2006. No. 50. P.112–126.
29. Gao L., Ebtehaj A., Wigneron Jean-Pierre, Crow W.T., Reager J.T., Warrick A.W. Retrieving global surface soil moisture from GRACE satellite gravity data // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 584. P. 1–12.
30. Abelen S., Seitz F. Relating satellite gravimetry data to global soil moisture products via data harmonization and correlation analysis // Remote Sensing of Environment. 2013. Vol. 136. P. 89–98.

31. De Jong R. and Bootsma A. Review of recent developments in soil water simulation models // Canadian Journal of Soil Science. I996. No. 63. P. 213–221.
32. Roose B. and Schnepf A. Mathematical models of plant-soil interaction. // Philosophical Transactions of Royal Society A. 2008. No. 366. P. 4597–4611.
33. Guo Z. and Dirmeyer P.A. Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 1. Inter-model comparison. // Journal of Geophysics Research – Atmospheres. 2006. No. 111. P. 1–15.
34. Yuan S. and Quiring S.M. Evaluation of soil moisture in CMIP5 simulations over the contiguous United States using in situ and satellite observations. // Hydrological Earth Systems. Science. 2017. No. 2. P. 2203–2218.
35. Van den Hurk, B., Kim H. and Krinner G. LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: The Land Surface, Snow and Soil Moisture Model Inter/comparison Project – Aims, setup and expected outcome // Geoscience Model Development. 2016. No. 9. P. 2809–2832.
36. Кельчевская Л.С. Влажность почв Европейской части СССР. Гидрометеоиздат, 1983. 184 с.
37. Мещерская А.В., Болдырева Н.А., Шапаева Н.Д. Средние областные запасы продуктивной влаги в почве и высота снежного покрова (Статистический анализ и примеры использования). Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 244 с.
38. Robock A., Vinnikov K.Y., Srinivasan G., Entin J.K., Hollinger S.E., Speranskaya N.A., Liu S., Namkhai A. The global soil moisture data bank // Bulletin of the American Meteorological Society. 2000. Vol. 81. No. 6.P. 1281–1299.
39. Robock A. et al. Forty-five years of observed soil moisture in Ukraine: No summer desiccation (yet) // Geophysics Research Letters. 2005. No. 32. P. 1–13.
40. Qin T., Feng J., Zhang X., Li C., Fan J., Zhang C., Dong B., Wang H., Yan D. Continued decline of global soil moisture content, with obvious soil stratification and regional difference // Science of the Total Environment. 2023. No. 864. P. 1–17.
41. Si J., Li J., Lu S., Qi X., Zhang X., Bao W., Zhang X., Zhou S., Jin C., Qi L. et al. Effects of Climate Change on Surface Runoff and Soil Moisture in the Source Region of the Yellow River // Water. 2023. No. 15. P. 1–20.
42. Berg A., Sheffield J. and Milly P.C. Divergent surface and total soil moisture projections under global warming // Geophysics Research Letters. 2017. No. 44. P. 236–244.
43. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 167 с.
44. Сиротенко О.Д. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования: метод. пособие. М.: Росгидромет, 2007. 77 с.
45. Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н., Долгий-Трач В.А. Разработка системы регионального круглогодичного мониторинга водно-теплового режима посевов сельскохозяйственных культур // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Калуга, 2008. Вып. 13. С. 276–281.
46. Сиротенко О.Д., Клещенко А.Д., Павлова В.Н., Абашина Е.В., Семендяев А.К. Мониторинг изменений климата и оценка последствий глобального потепления для сельского хозяйства // Агрофизика. 2011. № 3. С. 31–39.
47. Влагозапасы и промерзание почв, испарение с почвы и водной поверхности при региональном изменении климата. Рекомендации по расчету и прогнозу средних многолетних изменений. СПб: ART-XPRESS. 2015. 46 с.
48. Лавров С.А. Физико-математическая модель гидрофизических процессов формирования стока в течение климатического года. Модель «ГГИ – ГИДРОФИЗИКА» // Метеорология и гидрология. 2023. № 12.С. 57–68.
49. Калюжный И.Л., Лавров С.А. Гидрофизические процессы на водосборе. 2012, СПб: Нестор-История. 615 с.

REFERENCES

1. Lavrov S.A. Laws of formation of evaporation from the ground and water surfaces under the influence of climate change. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2019. No. 1. P. 4–23. https://orcid.org/: 10.35567/1999-4508-2019-1-1.

2. Jung, M. et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*. 2010. No. 467(7318). P. 951–954.
3. Rode A.A. Fundamentals of the doctrine of the soil moisture. Vol. 1. L.: Gidrometeoizdat, 1965. 663p.
4. Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B. and Teuling A.J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Review*. 2010. No. 99.P. 125–161.
5. Zhang J., Yang Z., Wu L. and Yang K. Summer high temperature extremes over northeastern China predicted by spring soil moisture. *Scientific Report*. 2019. No. 9. P. 1–12.
6. Hauser M., Orth R. and Seneviratne S.I. Role of soil moisture versus recent climate change for the 2010 heat wave in western Russia. *Geophysics Research Letters*. 2016. No. 43. P. 2819–2826.
7. Hauser M., Orth R., Seneviratne S.I. Investigating soil moisture-climate interactions with prescribed soil moisture experiments: An assessment with the Community Earth System Model (version 1.2). *Geoscience Model Development*. 2017. No. 10. P. 1665–1677.
8. Schwingshack C., Hirsch M., Seneviratne S. A theoretical approach to assess soil moisture-climate coupling across CMIP5 and GLACE-CMIP5 experiments. *Earth System Dynamics*. 2018. No. 9. P. 1217–1234.
9. Qiao L., Zuo Z., Xiao D. Evaluation of Soil Moisture in CMIP6 Simulations. *Journal of Climate*. 1922. Vol. 35. P. 779–800.
10. Berg A. and Sheffield J. Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Report*. 2018. No. 4. P. 180–191.
11. Mimeau L., Tramblay Y., Brocca L., Massari C., Camici S., Finaud-Guyot P. Modeling the response of soil moisture to climate variability in the Mediterranean region. *Earth Systems Science*. 2021. No. 25. P. 653–669.
12. Dobriya P., Quresh A., Badola R., Hussain S.A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 458–459. No. 21. P. 110–117.
13. Lekshmi S.S.U., Singh D.N., Baghinic M.S. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*. 2014. Vol. 54. P. 92–105.
14. Rasheed M.W., Tang, J., Sarwa A., Shah S., Saddique N., Khan M.U., Imran K.M., Nawaz S., Shamshiri R.R., Aziz M. et al. Soil Moisture Measuring Techniques and Factors Affecting the Moisture Dynamics. *A Comprehensive Review of Sustainability*. 2022. No. 14. P. 1–13.
15. Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D., Schremmer L., Petrakovic I., Zappa L., Preimesberger W., Xaver A., Annor F., Ardö J., Baldocchi D., Bitelli M., Blöschl G., Bogena H., Brocca L., Calvet J.-C., Camarero J.J., Capello G., Choi M., Cosh M.C., van de Giesen N., Hajdu I., Ikonen J., Jensen K.H., Kanniah K.D., de Kat I., Kirchengast G., Kumar Rai P., Kyrouac J., Larson K., Liu S., Loew A., Moghaddam M., Martínez Fernández J., Mattar Bader C., Morbidelli R., Musial J.P., Osenga E., Palecki M.A., Pellarin T., Petropoulos G.P., Pfeil I., Powers J., Robock A., Rüdiger C., Rummel U., Strobel M., Su Z., Sullivan R., Tagesson T., Varlagin A., Vreugdenhil M., Walker J., Wen J., Wenger F., Wigneron J.P., Woods M., Yang K., Zeng Y., Zhang X., Zreda M., Dietrich S., Gruber A., van Oevelen P., Wagner W., Scipal K., Drusch M. and Sabia R. The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade. *Hydrological Earth Systems Science*. 2021. No. 25. P. 5749–5804.
16. Babaeian E., Sadeghi M., Jones S.B., Montzka C., Vereecken H. & Tuller M. Ground, Proximal and Satellite Remote Sensing of Soil Moisture. *Reviews of Geophysics*. 2019. P. 530–616.
17. Rötzer K., Montzka C. and Vereecken H. Spatio-temporal variability of global soil moisture products. *Journal of Hydrology*. 2015. No. 522. P. 187–202.
18. Tavakol A., McDonough K.R., Vahid Rahmani V., Hutchinson S. The soil moisture data bank: The ground-based, model-based, and satellite-1 based soil moisture data. *Remote Sensing Applications Society and Environment*. 2021. No. 24 (11). P. 1–101.
19. Srivastava P.K. Satellite soil moisture: Review of theory and applications in water resources. *Water Resources Management*. 2017. No.31. P. 3161–3176.
20. Volchek A.A., Petrov D.O. Data sources of global monitoring of soil moisture with the Earth surface remote sensing means. *Hydro/meteorology and ecology*. 2021. No. 1. P. 38–43.

21. Albergel C., Dorigo W., Balsamo G., Muñoz-Sabater J., de Rosnay P., Isaksen, L., Brocca L., de Jeu R. and Wagner W. Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface re-analyses. *Remote Sensing of Environment*. 2012. No. 138. P. 77–89.
22. Fang L., Hain C.R., Zhan X. and Anderson M.C. An inter-comparison of soil moisture data products from satellite remote sensing and surface model. *International Journal of Applied Earth Observations*. 2016. No. 48. P. 37–50.
23. Wanders N., Karssenberg D., Bierkens M., Parinussa R., de Jeu R., van Dam J. and de Jong S. Observation uncertainty of satellite soil moisture products determined with physically-based modeling. *Remote Sensing of Environment*. 2012. No. 127. P. 341–356.
24. Borodina I. A., KizhnerL. I., Bogoslovskiy N.N., Erin S.I., Rudikov D.S. Comparison of satellite date of the soil moisture measurements ASCAT with direct measurements. *Newsletter of Tomsk State University*. 2014. No. 380. P. 181–184.
25. Crow W.T., Berg A.A., Cosh M.H., Loew A., Mohanty B.P., Panciera R., de Rosnay P., Ryu D. and Walker J.P. Up-scaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Revue of Geophysics*. 2012. No. 50. P. 1–12.
26. Li M., Sun H., Zhao R. A Review of Root Zone Soil Moisture Estimation Methods Based on Remote Sensing. *Remote Sensing*. 2023. No. 15. P. 5361–5372.
27. Tkachenko N.S., Lygin I.V. Application of GRACE satellite mission for solution of geological and geographical problems. *Newsletter of Moscow State University*. 2017. Series 4. Geology. No. 2. C. 3–7.
28. Schmidt R. and Coauthors. GRACE observations of changes in continental water storage. *Global Planetary Change*. 2006. No. 50. P.112–126.
29. Gao L., Ebtehaj A., Wigneron Jean-Pierre, Crow W.T., Reager J.T., Warrick A.W. Retrieving global surface soil moisture from GRACE satellite gravity data. *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 584. P. 1–12.
30. Abelen S., Seitz F. Relating satellite gravimetry data to global soil moisture products via data harmonization and correlation analysis. *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 136. P. 89–98.
31. De Jong R. and Bootsma A. Review of recent developments in soil water simulation models. *Canadian Journal of Soil Science*. I996. No. 63. P. 213–221.
32. Roose B. and Schnepf A. Mathematical models of plant-soil interaction. *Philosophical Transactions of Royal Society A*. 2008. No. 366. P. 4597–4611.
33. Guo Z. and Dirmeyer P.A. Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 1. Inter-model comparison. *Journal of Geophysics Research – Atmospheres*. 2006. No. 111. P. 1–15.
34. Yuan S. and Quiring S.M. Evaluation of soil moisture in CMIP5 simulations over the contiguous United States using in situ and satellite observations. *Hydrological Earth Systems Science*. 2017. No. 2. P. 2203–2218.
35. Van den Hurk, B., KimH. and KrinnerG. LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: The Land Surface, Snow and Soil Moisture Model Inter/comparison Project – Aims, setup and expected outcome. *Geoscience Model Development*, 2016. No. 9. P. 2809–2832.
36. Kelchevskaya L.S. Soil moisture of the European part of the USSR. Gidrometeoizdat, 1983. 184p.
37. Meshcherskaya A.V., Boldyreva N.A., Shapaeva N.D. Average regional reserves of productive moisture in soil and the snow cover height (Statistical analysis and examples of use). L.: Gidrometeoizdat, 1982. 244p.
38. Robock A., Vinnikov K.Y., Srinivasan G., Entin J.K., Hollinger S.E., Speranskaya N.A., Liu S., Namkhai A. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2000. Vol. 81. No. 6.P. 1281–1299.
39. Robock A. et al. Forty-five years of observed soil moisture in Ukraine: No summer desiccation (yet). *Geophysics Research Letters*. 2005. No.32. P. 1–13.
40. Qin T., Feng J., Zhang X., Li C., Fan J., Zhang C., Dong B., Wang H., Yan D. Continued decline of global soil moisture content, with obvious soil stratification and regional difference. *Science of the Total Environment*. 2023. No. 864. P. 1–17.
41. Si J., Li J., Lu S., Qi X., Zhang X., Bao W., Zhang X., Zhou S., Jin C., Qi L. et al. Effects of Climate Change on Surface Runoff and Soil Moisture in the Source Region of the Yellow River. *Water*. 2023. No. 15. P. 1–20.
42. Berg A., Sheffield J. and Milly P.C. Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. *Geophysics Research Letters*. 2017. No. 44.P. 236–244.

43. Sirotenko O.D. Mathematical modelling of water/thermal regime and agro/eco/systems productivity. L.: Gidrometeoizdat, 1981. 167 p.
44. Sirotenko O.D. Methods of the climate change assessment in the interests of agriculture and land use: methodical manual. M.: Rosgidromet, 2007. 77 p.
45. Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N., Dolgiy-Trach V.A. Development of the regionalall-year round monitoring of water/thermal regime of crops cultivation. *Proceedings of the regional natural sciences projects contest*. Kaluga, 2008. Issue 13. P. 276–281.
46. Sirotenko O.D., Kleshchenko A.D., Pavlova V.N., Abashina E.V., Semendyaev A.K. Climate change monitoring and assessment of the global warming consequences for agriculture. *Agrofizika*. 2011. No. 3. P. 31–39.
47. Moisture reserves and soil freezing, evaporation from the soil and water surfaces in case of regional climate change. Recommendations on calculating and forecast of average many-year changes. SPb: ART-XPRESS. 2015. 46 p.
48. Lavrov S.A. Physical/mathematical model of hydro/physical processes of the run off formation during a climatic year. "GGI-GIDROFIZIKA" model. *Meteorologyandhydrology*. 2023. No. 12. P. 57–68.
49. Kalyuzhniy I.L., Lavrov S.A. Hydro/physical processes on a catchment. 2012, SPb: Nestor-Istoria. 615 p.

Сведения об авторе:

Лавров Сергей Алексеевич, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Государственный гидрологический институт», Россия, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В.О., д. 23; https://orcid.org/0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

About the author:

Sergey A. Lavrov, Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, State Hydrological Institute (SHI), Vasilyevskiy Ostrov 2-nd Line, 23, St.-Petersburg, 199053, Russia; https://orcid.org/0000-0002-8140-5346; e-mail: sergey_lavrov_50@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 03.10.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 21.11.2024.
Принята к публикации / Accepted 30.12.2025.

УДК: 556.535.56 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-40-51*

Оценка изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея в современных климатических условиях

В.В. Зуев[1], В.А. Уйманова[1,2], Д.А. Вершинин[2], А.В. Павлинский[1]

wf@inbox.ru

[1]*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия*
[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Нижний Енисей является частью территории Российской Арктики, которая в современных климатических условиях становится все более чувствительной к их изменениям. Со сроками и продолжительностью ледовых явлений на реках Арктической зоны связаны многие виды хозяйственной деятельности. **Методы.** Для анализа межгодовых изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея (протяженностью от г. Енисейска до г. Дудинка) за период с 1938 по 2021 г. была создана электронная база данных с показателями продолжительности ледостава, датами начала и окончания ледовых явлений, а также максимальными уровнями воды во время фазы вскрытия (ледохода). В статье отражен методический подход в выделении трендовых составляющих за периоды наблюдений в 1938–1975 гг. и 1976–2021 гг., а также выявлено направление изменения продолжительности ледовых явлений и ледостава с проверкой уравнения тренда на статистическую однородность. **Результаты.** Установлено, что ледовые явления после 1975 г. стали наступать позже и заканчиваться раньше в среднем на 2–3 дня; ледостав стал наступать позже на 3–5 дней, разрушаться раньше на неделю. Анализ максимальных уровней воды в фазу вскрытия выявил, что эти показатели имеют тренд на снижение. Анализ изменчивости продолжительности ледовых явлений и ледостава обнаружил, что обе характеристики уменьшаются после 1975 года: продолжительность ледовых явлений сократилась на 2–5 дней, продолжительность ледостава – более чем на неделю.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ледовый режим, ледостав, ледовые явления, фаза замерзания, фаза вскрытия, Нижний Енисей

Финансирование: исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

Для цитирования: Зуев В.В., Уйманова В.А., Вершинин Д.А., Павлинский А.В. Оценка изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея в современных климатических условиях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 40–51. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-40-51, EDN: XLKNIM

© Зуев В.В., Уйманова В.А., Вершинин Д.А., Павлинский А.В., 2025

Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei in contemporary climatic conditions

Vladimir V. Zuev[1], **Valeria A. Uymanova**[1,2], **Dmitriy A. Vershinin**[2], **Aleksey V. Pavlinsky**[1]

✉ wf@inbox.ru

[1]*Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russia*
[2]*National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The area of Lower Yenisei is a part of the Russian Arctic territory, which is sensitive to modern changes of climatic conditions. Many types of economic activities are associated with the timing and duration of ice phenomena on the rivers of the Arctic zone. **Methods.** To analyze the inter-annual changes in the characteristics of the ice regime of Lower Yenisei (from Yeniseisk to Dudinka) for the period from 1938 to 2021. An electronic database was created containing the duration of ice formation, the duration of ice phenomena, the dates of the beginning and end of these phenomena, as well as the maximum water levels during the opening phase (ice break). The article presents a methodological approach in identifying trend components for the observation periods in 1938–1975 and 1976–2021, as well as the direction of changes in the duration of ice phenomena and ice formation, with a check of the trend equation for statistical uniformity. **Results.** Ice phenomena after 1975 began to occur later and end earlier by an average of 2–3 days; ice formation began to occur later by 3–5 days, ending earlier by a week. An analysis of the maximum water levels during the break-up phase showed a tend to decrease for the maximum water levels. An analysis of the variability in the duration of ice phenomena and ice formation showed that both characteristics decreased after 1975: the duration of ice phenomena decreased by 2–5 days, the duration of ice formation by more than a week.

KEYWORDS: ice regime, freeze-up, ice phenomena, freezing phase, break-up phase, Lower Yenisei

Financing: This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 121031300156-5).

For citation: Zuev V.V., Uymanova V.***A***., Vershinin D.A., Pavlinsky ***A***.V. Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei in contemporary climatic conditions. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 2. P. 40–51. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-40-51, EDN: XLKNIM

ВВЕДЕНИЕ

Нижний Енисей является частью территории Российской Арктики, которая в современных климатических условиях становится все более чувствительной к их изменениям. Часть этих трансформаций за последние 15 лет (2005–2021 гг.) отражена в работе [1]. Представляет интерес анализ изменчивости разных гидрологических характеристик ледового режима (продолжительности ледостава и ледовых явлений, дат их начала и окончания, колебаний максимальных уровней воды в ледоход) именно в их многолетних значениях. Со сроками и продолжительностью ледовых явлений на реках Арктической зоны связаны многие виды хозяйственной деятельности –

судоходство, строительство ледовых переправ, эксплуатация различных гидротехнических сооружений [2].

Многолетняя изменчивость характеристик ледового режима на реках – актуальная проблема для большинства водных объектов России и соседних государств [3–7], так как большая их часть находится в районах с умеренным или холодным климатом, который характеризуется длительным и устойчивым периодом отрицательных температур воздуха [8].

Исследования, затрагивающие ледовый режим в современных климатических условиях, отражены в работах [9–11] и показывают, что повышение зимней температуры проявляется, в частности, в смягчении ледового режима рек и озер. Так как в верховьях исследуемой реки и ее притоках расположен каскад ГЭС, большинство из которых функционирует на протяжении несколько десятилетий, возникает проблема одновременного воздействия климатических и антропогенных изменений характеристик стока реки на ее ледовый режим [12].

Целью данной статьи является изучение особенностей пространственно-временной изменчивости параметров ледового режима Нижнего Енисея за многолетний период с учетом влияния современных климатических условий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных использовались многолетние ряды наблюдений за характеристиками ледового режима – продолжительностью ледостава и ледовых явлений, датами их начала и окончания, а также за максимальными уровнями воды во время фазы вскрытия (ледохода)[1, 2]. Продолжительность ледостава определялась как период со дня появления неподвижного льда на водном объекте осенью до даты начала ледохода весной. Продолжительность ледовых явлений – период со дня появления первых ледовых явлений до полного очищения реки ото льда. За максимальный уровень воды в фазу вскрытия принимался максимальный уровень, который наблюдался в течение ледовых явлений после разрушения ледостава.

В работе проанализированы данные пяти гидрологических постов на р. Енисей, находящихся в непосредственной близости от метеорологических станций (ГМС) (табл. 1), имеющие временной ряд наблюдений не менее 40 лет [13]. Исследуемый период составил 83 года (с 1938 по 2021 г.). В расчетах использовались гидрологические годы (апрель – март). Исследования выполнены с использованием данных государственной наблюдательной сети Росгидромета.

Также использовалась среднесуточная температура воздуха холодного периода. Для находящихся в Арктической зоне России пунктов – (г. Игарка (ГМС Игарка), г. Дудинка (ГМС Дудинка) – это период с октябрь по май, для остальных (г. Енисейск (ГМС Енисейск), с. Верхнеимбатск (ГМС Верхнеимбатск), с. Селиваниха (ГМС Туруханск) – с ноября по март.

[1] Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ–МЦД) [Электр. ресурс]. URL: http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation (дата обращения: 01.10.2024).

[2] Список постов гидрологических наблюдений на реках, ручьях, каналах по УГМС // АИС ГМВО [Электр. ресурс]. URL: https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=139 (дата обращения: 01.10.2024).

Вся исходная информация была собрана в специальной электронной базе данных. На рис. 1 представлена схематическая карта расположения гидрологических постов и метеорологических станций.



Рис. 1. Схема расположения гидрологических постов и метеорологических станций на Нижнем Енисее [1].
Fig 1. Layout of gauging and weather stations on the Lower Yenisei.

Таблица 1. Исследуемые гидрологические посты и метеостанции на Нижнем Енисее
Table 1. The studied hydrological posts and weather stations on the Lower Yenisei

№	Наименование поста на р. Енисей	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км^2	Отметка нуля поста		Наименование ГМС рядом с постом
				высота, м	система высот	
1	г. Енисейск	2 054	1 400 000	64,78	БС	Енисейск
2	с. Верхнеимбатск	1 323	1 810 000	12,56	БС	Верхнеимбатск
3	с. Селиваниха	974	2 340 000	1,27	БС 77	Туруханск
4	г. Игарка	697	2 440 000	0,03	БС	Игарка
5	г. Дудинка	433	2 480 000	-2,71	БС	Дудинка

Методический подход заключался в выделении трендовых составляющих за периоды наблюдений в 1938–1975 гг. и 1976–2021 гг. Временные интервалы выбраны согласно наличию данных и исследуемой научной литературе. Согласно имеющимся данным, с 1976 г. наблюдается наиболее интенсивное потепление – начало современного изменения климата [14–16]. Единичные пропуски в данных о продолжительности ледостава заполнялись средним значением за период, в котором они наблюдались (либо средним за 1937–1975 гг., либо средним за 1976–2021 гг.). Также были проанализированы изменения продолжительности ледостава и ледовых явлений с проверкой уравнения тренда на статистическую однородность.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первым этапом исследований было определение дат начала и окончания ледостава и ледовых явлений, вычисление их продолжительности, средних значений. Для оценки влияния изменений климата на исследуемые характеристики Нижнего Енисея использовались данные о температуре воздуха за холодный период с ГМС, расположенных в непосредственной близости от гидрологических постов.

На рис. 2 отражены общие зависимости продолжительности ледостава, ледовых явлений и температуры воздуха холодного периода на примере данных с поста в с. Верхнеимбатск. Поиск взаимосвязи изменения продолжительности ледостава и ледовых явлений с изменением температуры холодного периода показал, что зависимость прямая: при повышении средней температуры воздуха холодного периода продолжительность ледовых явлений и ледостава уменьшается. При сравнении двух периодов – до и после наступления современного изменения климата – на всех пунктах наблюдений прослеживаются одинаковые тенденции: до 1975 г. температура воздуха холодного периода снижается, продолжительность ледостава и ледовых явлений растет; после 1975 г, наоборот, температура воздуха растет, а продолжительность ледостава и ледовых явлений падает. Есть исключение по

гидропосту в г. Енисейске: после 1975 г. продолжительность ледостава резко снижается, несмотря на понижение средних температур воздуха холодного периода (рис. 3). Весьма вероятно, это связано с близостью к Красноярской ГЭС, запущенной в эксплуатацию в 1967 г. [17].

Анализ максимальных уровней воды в фазе вскрытия (ледохода) показал, что значимый тренд (падение) проявляется за весь период наблюдений только на гидропосту в г. Енисейске. При делении на периоды значимой зависимости не наблюдается. До 1975 г. максимальные уровни растут на гидропостах в с. Верхнеимбатск, г. Игарка и г. Дудинка, падают в г. Енисейске (значимый тренд) и с. Селиваниха. После 1975 г. растут только в г. Енисейске.

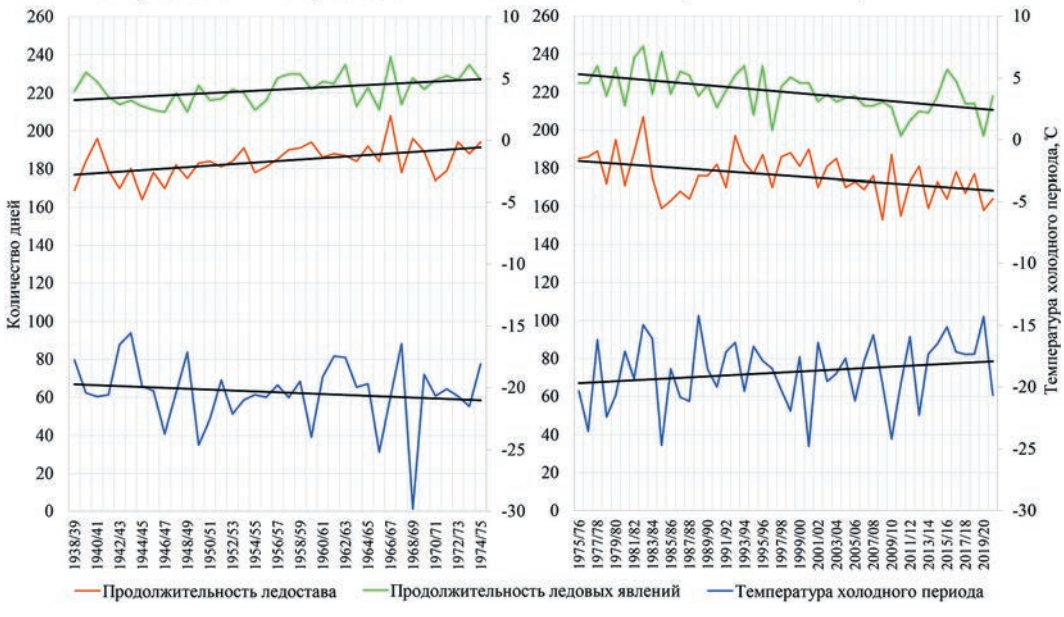


Рис. 2. Продолжительность ледостава и ледовых явлений на гидропосту с. Верхнеимбатск с температурой холодного периода на ГМС Верхнеимбатск (1938–2021 гг.).
Fig 2. Duration of freeze-up and ice phenomena at the gauging station Verkhneimbatsk with cold period temperatures at the Verkhneimbatsk weather station (1938–2021).

До 1975 г. продолжительность ледовых явлений изменилась от 208 дней (г. Енисейск) до 234 дней (г. Игарка), после 1975 г. – от 203 (г. Енисейск) до 236 (г. Дудинка). Ряды продолжительности достаточно согласованны между собой за весь период исследований, средний коэффициент равен 0,49 (табл. 2). Наибольшей согласованностью характеризуется изменение продолжительности ледовых явлений на гидропостах в г. Игарка и с. Селиваниха (0,6), наименьшей – в г. Игарка и г. Енисейске (0,26). Если сравнивать по периодам, то согласованность растет: общий коэффициент корреляции возрастает с 0,47 (до 1975 г.) до 0,5 (после 1975 г.).

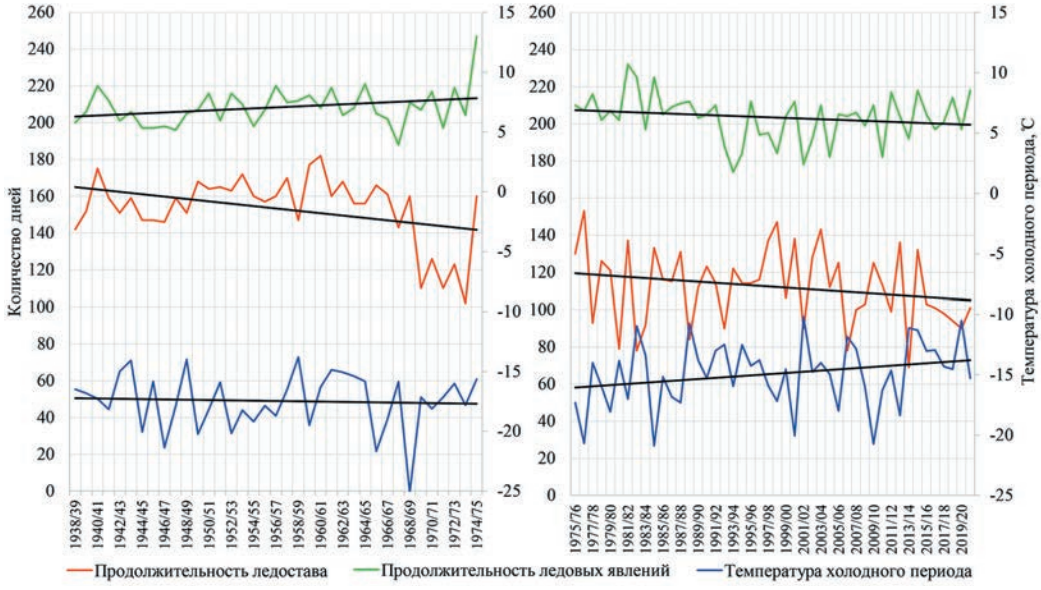


Рис. 3. Продолжительность ледостава и ледовых явлений на гидропосту г. Енисейска с температурой холодного периода на ГМС Енисейск (1938–2021 гг).
Fig 3. Duration of freeze-up and ice phenomena at the Yeniseisk gauging station with the temperature of the cold period at the Yeniseisk weather station (1938–2021).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между рядами изменения продолжительности ледостава за период с 1938 по 2021 г. (1 – г. Енисейск, 2 – с. Верхнеимбатск, 3 – с. Селиваниха, 4 – г. Игарка, 5 – г. Дудинка)
Table 2. Correlation coefficients between series of changes in freeze-up duration for the period from 1938 to 2021 (1 – Yeniseisk, 2 – Verkhneimbatsk, 3 – Selivanikha, 4 – Igarka, 5 – Dudinka)

Период	1938–2021 гг				1938–1975 гг				1976–2021 гг			
пост	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	0,41	-	-	-	0,22	-	-	-	0,23	-	-	-
3	0,27	0,70	-	-	-0,04	0,65	-	-	0,22	0,69	-	-
4	0,23	0,63	0,63	-	-0,02	0,44	0,59	-	0,08	0,65	0,61	-
5	0,28	0,71	0,65	0,82	-0,30	0,42	0,59	0,71	0,12	0,75	0,97	0,83
среднее	0,53				0,33				0,52			

До 1975 г. продолжительность ледостава изменяется от 153 дней (г. Енисейск) до 223 дней (г. Дудинка), после 1975 г. – от 112 (г. Енисейск) до 215 (г. Дудинка). Ряды продолжительности достаточно согласованны между собой за весь период исследований, средний коэффициент корреляции равен 0,53. Наибольшей согласованностью характеризуется изменение продолжительности ледовых явлений на гидропостах в г. Игарка и г. Дудинка (0,82), наименьшей – г. Игарка и г. Енисейск (0,23). Если сравнивать по периодам (табл. 2), то согласованность увеличивается: общий коэффициент корреляции вырастает с 0,33 (до 1975 г.) до 0,52 (после 1975 г.).

Анализ изменчивости продолжительности ледовых явлений и ледостава показал, что обе характеристики уменьшаются после 1975 года, за исключени-

ем данных в г. Дудинка, что связано с механической рубкой льда в целях обеспечения навигации. Самая большая разница продолжительности ледовых явлений зафиксирована в г. Енисейске – 41 день (табл. 3).

Таблица 3. Продолжительность ледовых явлений и ледостава за период с 1938 по 2021 г.
Table 3. Duration of ice phenomena and freeze-up for the period from 1938 to 2021

Пост на р. Енисей	Продолжительность ледовых явлений (дни)					
	среднее за период			смещение от среднего		разница
	1938–2021	1938–1975	1976–2021	1938–1975	1976–2021	
г. Енисейск	206	208	203	-3	2	5
с. Верхнеимбатск	221	222	220	-1	1	2
с. Селиваниха	228	229	227	-2	1	3
г. Игарка	232	234	231	-1	1	3
г. Дудинка	235	233	236	2	-1	-3
Пост на р. Енисей	Продолжительность ледостава (дни)					
	среднее за период			смещение от среднего		разница
	1938–2021	1938–1975	1976–2021	1938–1975	1976–2021	
г. Енисейск	131	153	112	-23	18	41
с. Верхнеимбатск	180	184	176	-4	4	8
с. Селиваниха	194	197	191	-3	2	5
г. Игарка	213	216	209	-4	3	7
г. Дудинка	219	223	215	-5	4	8

Обоснование многолетних изменений сроков начала и окончания ледовых явлений и ледостава, а также их продолжительности выполнено путем оценки значимости линейного тренда для зависимости $T = at + b$ по двум методам.

Первый метод: тренд значим, если

$$|R| > t_{2\alpha}\sigma_R, \quad (1)$$

$$\text{где } \sigma_R = (1 - R^2) / \sqrt{n - 1}, \quad (2)$$

где R – коэффициент корреляции; $t_{2\alpha}$ – статистика распределения Стьюдента, равная 1,96 для уровня значимости 0,05, σ_R – погрешность расчета коэффициента корреляции, n – число членов ряда наблюдений.

Второй метод: тренд значим, если

$$|a| > t_{2\alpha}\sigma_R, \quad (3)$$

$$\text{где } \sigma_a = \frac{\sigma_T^*}{\sigma_t^*}\sqrt{\frac{1 - R^2}{n - 2}}, \quad (4)$$

где σ_a – стандартная ошибка параметра линейного уравнения регрессии, σ_T^* и σ_t^* – несмещенные оценки среднего коэффициента отклонения соответственно для ряда T – сроков начала и окончания ледовых явлений, продолжительности ледовых явлений и ледостава – и ряда t – порядковых номеров лет наблюдений; R, $t_{2\alpha}$ и n – как для формул (1, 2) [18].

Оценка значимости уравнений линий тренда относительно характеристик ледового режима за все время наблюдений и по отдельным климатическим периодам показала, что значимые изменения на всех исследуемых постах затрагивают в основном только продолжительность ледостава, которая имеет тренд на снижение (табл. 4). Полученные на основе эмпирических данных уравнения линейной регрессии можно использовать в качестве прогностической зависимости или расчетной формулы, однако это является корректным только в случае, если данные уравнения обеспечивают необходимую точность расчета или, проще говоря, являются надежными [20].

Таблица 4. Оценка значимостей уравнений линий тренда
Table 4. Estimates of new trend lines

Характеристика	Продолжительность ледовых явлений			Продолжительность ледостава			Дата начала ледовых явлений			Дата окончания ледовых явлений			Дата начала ледостава			Дата окончания ледостава		
период	1938-2021	1938-1975	1976-2021	1938-2021	1938-1975	1976-2021	1938-2021	1938-1975	1976-2021	1938-2021	1938-1975	1976-2021	1938-2021	1938-1975	1976-2021	1938-2021	1938-1975	1976-2021
г. Енисейск – ГМС Енисейск																		
$\|R\|/\sigma_R$	1,8	1,9	1,3	**13,6**	**2,6**	1,5	0,6	0,7	0,5	1,8	**2,2**	1,2	**2,1**	1,3	0,6	**10,8**	1,7	1,2
$\|a\|/\sigma_a$	1,9	1,9	0,2	**8,9**	**2,2**	0,2	0,7	0,6	0,4	1,8	1,9	1,1	**2,1**	1,3	0,6	**8,0**	1,5	1,2
с. Верхнеимбатск – ГМС Верхнеимбатск																		
$\|R\|/\sigma_R$	1,7	**3,1**	**4,8**	**3,7**	**3,9**	**3,1**	**2,0**	0,6	**3,5**	0,7	**3,7**	**2,8**	**3,7**	1,0	**2,8**	1,7	**4,0**	1,4
$\|a\|/\sigma_a$	1,6	**2,7**	**4,1**	**3,7**	**3,1**	**2,8**	1,9	**3,8**	**3,2**	0,6	**3,2**	**2,3**	**3,3**	1,0	**2,5**	1,6	**3,4**	1,4
с. Селиваниха – ГМС Туруханск																		
$\|R\|/\sigma_R$	**2,3**	1,1	**4,0**	**2,6**	**4,9**	**3,1**	**2,0**	0,7	**3,4**	1,3	1,8	**2,2**	**2,1**	**2,8**	1,6	1,6	**2,6**	**2,6**
$\|a\|/\sigma_a$	**2,1**	1,1	**3,5**	**3,1**	**4,5**	**2,9**	**2,1**	0,6	**3,0**	1,3	1,6	**2,1**	**2,0**	**2,5**	1,6	1,6	**2,3**	**2,4**
г. Игарка – ГМС Игарка																		
$\|R\|/\sigma_R$	**2,2**	**3,0**	**4,1**	**3,6**	**2,5**	**4,2**	0,7	1,0	**3,2**	**2,2**	**2,3**	**2,2**	0,8	1,1	**2,6**	**4,5**	**2,5**	**3,5**
$\|a\|/\sigma_a$	**2,3**	**2,7**	**3,6**	**3,5**	**2,3**	**3,7**	0,7	0,9	**2,9**	**2,2**	**2,1**	**2,1**	0,9	1,1	**2,5**	**4,2**	**2,3**	**3,2**
г. Дудинка – ГМС Дудинка																		
$\|R\|/\sigma_R$	**3,4**	**4,7**	**6,2**	0,3	**7,0**	**3,0**	1,1	1,3	**5,6**	0,5	**5,5**	**2,9**	**2,0**	**3,6**	1,6	**3,8**	**3,6**	**2,7**
$\|a\|/\sigma_a$	**3,1**	**3,5**	**4,9**	0,2	**5,1**	**2,8**	1,0	1,3	**4,6**	0,6	**4,4**	**2,6**	1,9	**3,0**	1,4	**5,4**	**3,1**	**2,1**

*жирным шрифтом выделены значимые показатели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования характеристик ледового режима на Нижнем Енисее можно сделать следующие выводы:

При сравнении двух периодов до и после наступления современного изменения климата замечено, что ледовые явления после 1975 г. стали наступать позже и заканчиваться раньше в среднем на 2–3 дня; ледостав стал наступать позже на 3–5 дней, разрушаться раньше на неделю, при этом на гидропосту в г. Енисейске – более чем на 2 недели.

Анализ максимальных уровней воды в фазу вскрытия показал, что максимальные уровни воды имеют тренд на снижение, значимый только на гидропосту в г. Енисейске.

Анализ изменчивости продолжительности ледовых явлений и ледостава показал, что обе характеристики уменьшались после 1975 года: продолжительность ледовых явлений сократилась на 2–5 дней, продолжительность ледостава – более чем на неделю, в частности на гидропосту в г. Енисейске – на 41 день.

Полученные результаты дают возможность улучшить планирование и организацию работы водного транспорта и гидротехнических сооружений, а дальнейшие исследования особенностей ледового режима рек данной территории смогут снизить возможные негативные последствия от воздействий ледового режима на экономическую деятельность.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зуев В.В., Уйманова В.А., Павлинский А.В. Современные особенности ледового режима Нижнего Енисея // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 3. С. 101–113. https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-101-113
2. Агафонова С. А. Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. 2019. № 1. С. 81–94.
3. Zuev V.V., Korotkova E.M., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Water level regime of the Maima river (Mountain Altai) in the context of modern climate changes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012072.
4. Маргарян В.Г., Вершинин Д.А. Проявления изменения климата в ледовом режиме рек бассейна р. Дебед (Армения) // Геосферные исследования. 2021. № 1. С. 94–103.
5. Дмитриева В.А., Сушков А.И. Температурный режим Воронежской области в условиях меняющегося климата // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2023. № 2. С. 56–63.
6. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. № 3. С. 32–45.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 16. Ангаро-Енисейский район. Выпуск 1. Енисей. / сост. М.В. Кириллов, В.А. Шуб, М.Ф. Елизарьева [и др.]; под ред. А.П. Муранова. 1973. 723 с.
8. Калинин В.Г. Ледовый режим рек и водохранилищ бассейна Верхней и Средней Камы. Пермь: Пермский гос. ун-т, 2008. 252 с.
9. Смахтин В. К. Ледовый режим озёр Забайкалья в условиях современного потепления // Лед и снег. 2018. Т 58. № 2. С. 225–230.
10. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы. 2007. Т 34. № 2. С. 141–149.
11. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2019. №. 55. С. 86–98.
12. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишникова Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233–251.
13. Калинин В.Г. О выборе репрезентативного расчетного периода наблюдений при изучении ледового режима рек // Географический вестник. 2020. № 1 (52). С. 120–129.
14. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Изд-во ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2014. 1009 с.

15. Семёнов В.А. Климатическая обусловленность экстремальности гидрологических явлений на реках и экологического состояния рек и водоемов в горах юга Сибири / В.А. Семёнов, И.В. Семёнова, Т.В. Больбух, Е.И. Авдюшкина // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 25-летнему юбилею Института водных и экологических проблем СО РАН. Барнаул, 20–24 августа 2012 г. Барнаул, 2012. Т. 1. С. 135–139.
16. Харламова Н.Ф. Долговременные климатические изменения на внутриконтинентальной территории России (Алтайский регион) // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 3-1. С. 133–140.
17. Бураков Д.А., Ковшова Е.П., Ромасько В.Ю. Прогноз элементов ледового режима р. Енисей в осенне-зимний период в нижних бьефах высоконапорных ГЭС // Метеорология и гидрология. 2008. № 5. С. 93–102.
18. Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации. Учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». СПб.: изд. РГГМУ, 2007. 279 с.

REFERENCES

1. Zuev V.V., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Modern characteristics of the ice regime of the Lower Yenisei. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2024. No. 3. P. 101–113 https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-101-113 (In Russ.).
2. Agafonova S.A. Studies of the ice regime of the rivers of the Arctic zone of Russia in the XX and XXI centuries. *Arctic and Antarctic*. 2019. No. 1. P. 81–94 (In Russ.).
3. Zuev V.V., Korotkova E.M., Uymanova V.A., Pavlinskiy A.V. Water level regime of the Maima river (Mountain Altai) in the context of modern climate changes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2018. Vol. 211. P. 012072.
4. Margaryan V.G., Vershinin D.A. Manifestations of climate change in the ice regime of the rivers of the Debed River basin (Armenia). *Geosphere research*. 2021. No. 1. P. 94–103 (In Russ.).
5. Dmitrieva V.A., Sushkov A.I. Thermal Regime in the Voronezh Region in a Changing Climate. *Proceedings of VSU, Series: Geography. Geo/ecology*. 2023. No. 2. P. 56–63 (In Russ.).
6. Vuglinsky V.S. Assessment of changes in the characteristics of the ice regime of water bodies for various regions of the country in modern climatic conditions. *Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*. 2014. No. 3. P. 32–45 (In Russ.).
7. Surface water resources of the USSR. Volume 16. Angara-Yenisei region. Issue 1. Yenisei. / Comp. M.V. Kirillov, V.A. Shub, M.F. Elizaryeva; Ed. Ph. D. geogr. Sciences A.P. Muranova. 1973. 723 p. (In Russ.).
8. Kalinin V.G. Ice regime of rivers and reservoirs of the Upper and Middle Kama basin. Perm: Perm State University, 2008. 252 p. (In Russ.).
9. Smakhtin V.K. The ice regime of the lakes of Transbaikalia in the conditions of modern warming. *Ice and snow*. 2018. Vol. 58. No. 2. P. 225–230 (In Russ.).
10. Agafonova S.A., Frolova N.L. Features of the ice regime of the rivers of the Northern Dvina basin. *Water resources*. 2007. Vol. 34. No. 2. P. 141–149.
11. Lobanov V.A., Goroshkova N.I. Characteristics of ice regime of the rivers of the Sakha Republic (Yakutia) and their climate changes. *Scientific notes of the Russian State Hydro/meteorological University*. 2019. No. 55. P. 86–98 (In Russ.).
12. Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Agafonova S.A., Povalishnikova E.S. Anthropogenic and climate-related changes in water flow and ice phenomena in rivers of the Russian Arctic. *Issues of geography*. 2018. No. 145. P. 233–251 (In Russ.).
13. Kalinin V.G. On the choice of a representative design observation period when studying the ice regime of rivers. *Geographical Bulletin*. 2020. No. 1 (52). P. 120–129 (In Russ.).
14. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. M.: Publishing house of the Federal State Budgetary Institution "IGKE Roshydromet and RAS", 2015. 1008 p. (In Russ.).
15. Semenov V.A. Climatic conditionality of extreme hydrological phenomena on rivers and the ecological state of rivers and reservoirs in the mountains of Southern Siberia / V.A. Semenov, I.V. Semenova, T.V. Bolbukh, E.I. Avdyushkina. *Water and environmental problems of Siberia and Central Asia: proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. All-Russian sci-

entific conference with international participation dedicated to the 25th anniversary of the Institute of Water and Environmental Problems SB RAS. Barnaul, August 20–24, 2012. Barnaul, 2012. Vol. 1. P. 135–139 (In Russ.).
16. Kharlamova N.F. Long-Term Climatic Changes in the Intercontinental Territory of Russia (Altai Region). *News of the Altai State University*. 2010. No. 3-1. P. 133–140 (In Russ.).
17. Burakov D.A., Kovshova E.P., Romasko V.Yu. Forecast of some components of the Yenisei river ice regime in the downstream of high-head hydroelectric power station. *Meteorology and hydrology*. 2008. No. 5. P. 93–102 (In Russ.).
18. Sikan A.V. Methods of statistical processing of hydrometeorological information. Textbook. The specialty is "Hydrology" and the training area is "Hydrometeorology". St. Petersburg: Publishing House of the Russian State Medical University, 2007. 279 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Зуев Владимир Владимирович, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; https://orcid.org/ 0000-0002-2351-8924; e-mail: vzuev@list.ru

Уйманова Валерия Александровна, канд. геогр. наук, научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; доцент кафедры гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Минобрнауки РФ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; https://orcid.org/ 0000-0002-1248-7122; e-mail: skvaleri91@mail.ru

Вершинин Дмитрий Александрович, канд. геогр. наук, доцент кафедры гидрологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Минобрнауки РФ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; https://orcid.org/ 0000-0002-2827-7955; e-mail: daversh@rambler.ru

Павлинский Алексей Валерьевич, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН», 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3; https://orcid.org/ 0000-0002-0426-9555; e-mail: wf@inbox.ru

About the authors:

Vladimir V. Zuev, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Principal Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Akademichesky st., 10/3, Tomsk, 634055, Russia; https://orcid.org/0000-0002-2351-8924; e-mail: vzuev@list.ru

Valeria A. Uymanova, Candidate of Geographical Sciences, Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Akademichesky st., 10/3, Tomsk, 634055, Russia; Associate Professor, Department of Hydrology, National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36; Tomsk, 634050, Russia; https://orcid.org/0000-0002-1248-7122; e-mail: skvaleri91@mail.ru

Dmitriy A. Vershinin, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Hydrology, National Research Tomsk State University, Lenin Ave., 36; Tomsk, 634050, Russia; 0000-0002-2827-7955; e-mail: daversh@rambler.ru

Aleksey V. Pavlinsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of monitoring of climatic and ecological systems SB RAS, Akademichesky st., 10/3, Tomsk, 634055, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0426-9555; e-mail: wf@inbox.ru

Поступила в редакцию / Received 06. 02.2025.
Поступила после рецензирования / Revised 20.02 2025.
Принята к публикации / Accepted 13.03.2025.

УДК 556.3;551.4 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-52-71*

Статистические характеристики грунтовых вод Теплостанской возвышенности Москвы

Н.Д. Дубов, О.М. Розенталь ✉
✉ omro3@yandex.ru
Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье представлены результаты геостатистического исследования грунтовых вод Юго-Западного административного округа Москвы, проведенного в целях выявления возможностей и рисков подземного водопользования в этом районе. **Методы.** Применялись как традиционные технологии, так и индекс Морана для оценки характера пространственной связности. С помощью удельного комбинаторного индекса загрязненности (УКИЗВ) получены и оценены состав и свойства воды, что позволит опираться на данные УКИЗВ при питьевом водопользовании. **Результаты.** Выявлено, что временные ряды контролируемых показателей вариабельны настолько, что их стандартное отклонение часто превышает среднее значение. При оценке коэффициентов корреляции концентрации химических веществ в пунктах наблюдения обнаружено синхронное повышение/понижение значений целого ряда контролируемых показателей, например концентрации алюминия на ряде скважин и родников. Очевидны причины подобной согласованности в случае близости точек наблюдения, тогда как при их значительном удалении друг от друга такой эффект можно объяснить исключительно фактом быстрого внутрипластового массопереноса загрязненной воды. Обнаружена высокая парная корреляция (r = 0,94) концентрации ряда загрязняющих веществ, например Al с Mn, NO_3, причиной этого предположительно являются совместные сбросы указанных веществ промышленными предприятиями Москвы с одновременным проникновением сточных вод в грунт, сочетающимся с их массопереносом. Исследовано образование гидрохимических «фаций» рассматриваемого участка Теплостанской возвышенности в разные годы: наблюдение за темпом их деформации позволило получить картографическую информацию о формировании качества грунтовых вод и возможности их хозяйственного использования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Теплостанская возвышенность, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, диаграмма Пайпера, вариограмма, индекс Морана, грунтовые воды, загрязняющие вещества, антропогенное воздействие, гидрохимические фации.

Финансирование: Работа выполнена в рамках темы № FMWZ-2025-0002 государственного задания Института водных проблем РАН.

Для цитирования: Дубов Н.Д., Розенталь О.М. Статистические характеристики грунтовых вод Теплостанской возвышенности Москвы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 52–71. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-52-71, EDN: ZQOSDC.

© Дубов Н.Д., Розенталь О.М., 2025

Statistical characteristics of groundwater in the Teplostanskaya Upland of Moscow

Nikita D. Dubov, Oleg M. Rozental

omro3@yandex.ru

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. The article presents the results of a geostatistical study of groundwater in the South-West Administrative District of Moscow in order to identify the potential and risks of groundwater use in this area using both traditional technologies and the Moran index to assess the nature of spatial connectivity. **Methods.** Using the specific combinatorial pollution index (SCPI), the composition and properties of water were obtained and assessed, which will allow relying on the SCPI data for drinking water use. **Results.** It is also shown that the time series of the monitored indicators are so variable that their standard deviation often exceeds the average value; when assessing the correlation coefficients of chemical concentrations at observation points, a synchronous increase/decrease in the values of a number of monitored indicators was found, for example, the concentration of aluminum at a number of wells and springs. The reasons for such consistency in the case of proximity of observation points are obvious, whereas with their significant distance from each other, the effect can be explained solely by the fact of rapid intra-formational mass transfer of contaminated water. A high pair correlation (r = 0.94) of the concentration of a number of pollutants was found, for example, Al with Mn, NO_3, and it was suggested that this is due to the combined discharge of these substances by industrial enterprises of Moscow with the simultaneous penetration of wastewater into the soil, combined with their mass transfer. The formation of hydro/chemical "facies" of the considered section of the Teplostanskaya Upland in different years was studied; monitoring the rate of their deformation made it possible to obtain cartographic information on the formation of groundwater quality and the possibility of their economic use.

KEYWORDS: Teplostanskaya upland, Piper diagram, variogram, kriging method, Moran's index, groundwater, pollutants, anthropogenic impact, hydro/chemical facies.

Funding: The work has been done within the framework of theme No. FMWZ-2025-0002 of the governmental assignment of the Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dubov N.D., Rozental O.M. Statistical characteristics of groundwater in the Teplostanskaya Upland of Moscow. *Water Management of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 2. P. 52–71. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-52-71, EDN: ZQOSDC.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие юго-западных территорий Москвы повышает значимость исследования характеристик водонасыщенных грунтов и процессов гидрогенеза в них, особенно в гипорейной зоне (изобилующей родниками вблизи Москвы-реки). Наблюдение за меняющимся составом и свойствами воды здесь особенно важно при ее использовании для нужд рассматриваемой урбоэкосистемы, в т. ч. инженерных изысканий и строительства[1] [1]. В исследованиях,

[1] ФГБУ «Центральное УГМС». Бюллетень загрязнения окружающей среды Московского региона за 2023 г. М., 2024. 44 с.

выполненных для достижения указанной цели, учитывались результаты измерения 23 показателей состава и свойств воды на участке волжско-альбского терригенного комплекса Теплостанской возвышенности (ТВ), полученные природоохранным учреждением Департамента природопользования и охраны окружающей среды Москвы «Мосэкомониторинг» в 2018–2023 гг. на 9 скважинах и 14 родниках. Эти точки наблюдения отмечены на рис. 1 как «рыбий глаз» и синий маркер (Unicode) соответственно. На рис. 1 и далее по тексту для удобства анализа родники, находящиеся в непосредственной близости друг от друга, объединены в группы: 1а – 1д в группу 1; 2а – 2д в группу 2; 3а – 3в в группу 3.

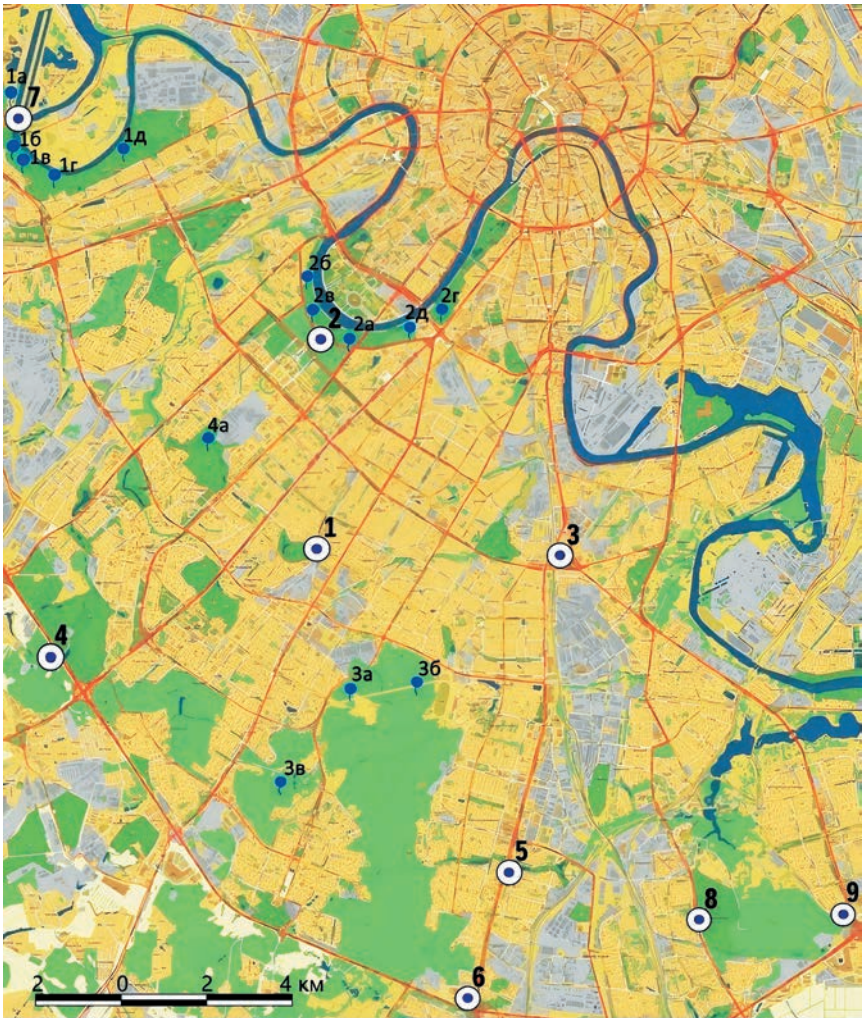


Рис. 1. Локализация наблюдательных скважин и родников на территории Теплостанской возвышенности ЮЗАО Москвы.
Fig. 1. Localization of observation wells and springs on the territory of the Teplostanskaya upland of the South-West Administrative District of Moscow.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описательная статистика экспериментальных данных

Для оценки характеристик состава и свойств воды определяли приведенный к средневзвешенному значению удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), характеризующий долю загрязняющего эффекта, вносимого каждым из устанавливаемых по результатам гидромониторинга показателей. Увеличение концентрации загрязняющих воду веществ рассматривается как ухудшение условий существования водной экосистемы [2, 3].

Данные УКИЗВ при оценке уровня загрязненности воды показывают, что во всех скважинах качество воды неблагоприятное для водопользования. Так, в скважинах 1, 3, 5 и 6 вода загрязнена больше всего, что может свидетельствовать о сильном антропогенном влиянии: все эти скважины, кроме 1-й, расположены в непосредственной близости к крупным автодорогам – ТТК (3-е транспортное кольцо) и МКАД – и подвержены выбросам и потокам загрязнений от автомобилей, а также инфильтрации загрязненной воды от большого количества автосервисов.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, например для предприятий пищевой промышленности, на рассматриваемом водоносном горизонте нет, и даже родниковая вода требует доочистки, хотя для полива растений она вполне пригодна (табл. 1).

Графическое представление результатов измерения приоритетных веществ, загрязняющих подземные воды

В целях сравнения ионного состава воды исследуемых скважин и родников были построены диаграммы Пайпера [4, 5], пример которых по данным измерений в сентябре, ноябре 2023 г. приведен на рис. 2. Преобладающий катион в пробах воды – кальций. Основного общего аниона обнаружить не удалось. Вода имеет преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый состав (скважины 4, 7, 8, группа родников 1 и родник 4а), часто включающий хлорид кальция (скважины 5, 6, 9), а также гидрокарбонат кальция и хлорид натрия (скважины 1–3, группы родников 2, 3). При этом концентрация хлоридов, гидрокарбонатов и сульфатов заметно варьировала в зависимости от локализации пункта наблюдения, по-видимому, под влиянием не только природных, но и антропогенных факторов.

Из выполненного анализа следует, что в ЮЗАО Москвы могут быть выделены следующие грунтовые воды:

– на северо-западной окраине (район Крылатское) – кальциево-гидрокарбонатные (Ca-HCO_3),

– в центральной и северной зонах (Воробьевы горы, Теплый стан) – смешанного состава (Na-HCO_3-Cl),

– в юго-восточной части (районы Чертаново и Бирюлево) – кальциево-гидрокарбонатно-хлоридные (Ca-Na-HCO_3-Cl).

Увеличение количества анионов Cl в химическом составе грунтовых вод на юго-востоке изучаемой территории предположительно связано с наличием здесь большого числа промышленных предприятий (промзоны рядом с МКАД).

Таблица 1. Характеристика состава и свойств воды родников (R) и скважин (Скв.) по данным индексов УКИЗВ (приложение К из РД[2])
Table 1. Characteristics of the composition and properties of water from springs (R) and wells (Skv.) according to the SCPI indices (Appendix K of RD[2])

Источник	УКИЗВ	Класс воды	Уровень загрязненности	Превышение ПДК
R 1а	0	1-й	условно чистая	нет
R 1б				
R 1в				
R 1г				
R 1д				
R 2а				
R 2б	0,57	1-й	условно чистая	Fe
R 2в	0,6	1-й	условно чистая	Fe
R 2г	0,39	1-й	Условно чистая	Mn
R 2д	0	1-й	условно чистая	нет
R 3а				
R 3б				
R 3в				
R 4а	0,58	1-й	условно чистая	Mn
Скв. 1	4,26	4-й, «а»	грязная вода	Mn, Fe, Cl, нефтепродукты
Скв. 2	1,66	2-й	слабо загрязненная	нефтепродукты
Скв. 3	3,88	4-й, разряд «а»	грязная вода	нефтепродукты
Скв. 4	1,13	2-й	слабо загрязненная	нефтепродукты
Скв. 5	3,72	4-й, разряд «а»	грязная вода	Fe, Mn, нефтепродукты
Скв. 6	3,24	4-й, разряд «а»	грязная вода	Fe, Mn
Скв. 7	1,87	3-й, разряд «а»	загрязненная	нефтепродукты
Скв. 8	1,67	3-й, разряд «а»	загрязненная	нефтепродукты, Mn
Скв. 9	2,36	3-й, разряд «а»	загрязненная	Fe

Эти заключения могут послужить основой для дальнейшего анализа естественных и природно-техногенных процессов в системе управления земельными ресурсами городских территорий [6].

Учитывая влияние градостроительства на водосборные бассейны Москвы [7], можно предположить, что накопления кальция и гидрокарбонатов в центральной части ЮЗАО – результат выщелачивания кальцита из бетона швов, облицовки и травертиновых наростов подземных коллекторов рек, таких как Водянка (левый приток р. Чертановки). Поэтому целесообразно провести обследование и при необходимости восстановление этих коллекторов. В целом же подземные водотоки (реки, искусственно убранные в старые и ветхие подземные коллекторы) через трещины и обвалы будут взаимодействовать с подземными водами и транспортировать загрязняющие вещества, фиксируемые при анализе корреляций в точках наблюдения, часто разделенных большим расстоянием.

[2] РД 52.24.643-2002. Руководящий документ. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям (утв. и введен в действие Росгидрометом 03.12.2002).

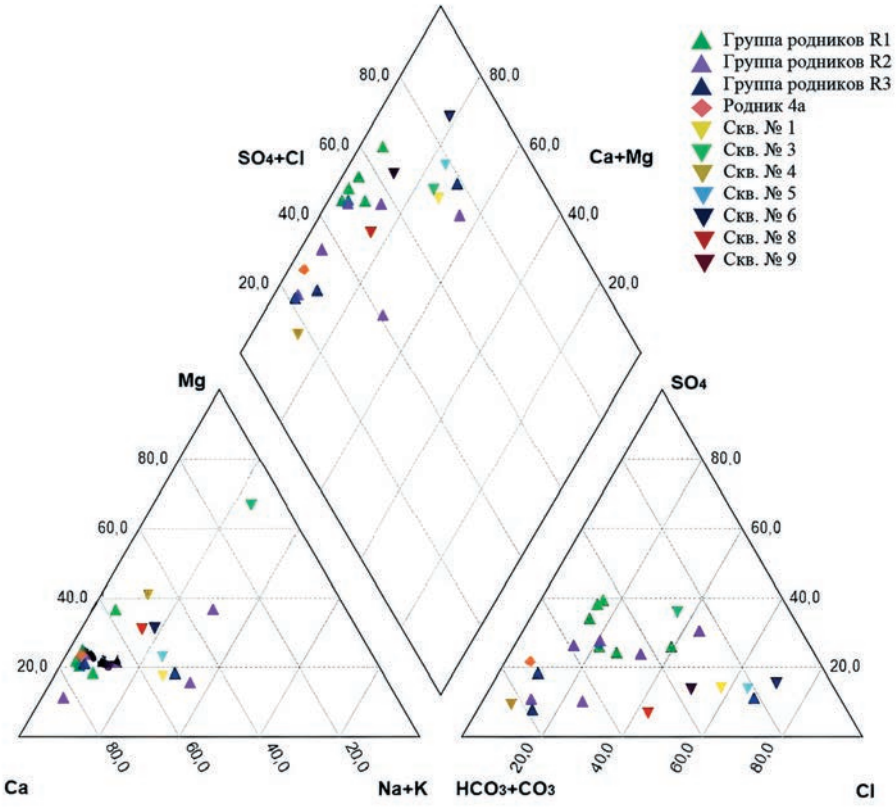


Рис. 2. Диаграмма Пайпера, представляющая соотношение ионов, % – экв/л.
Fig. 2. Piper diagram representing the ratio of ions, % – eq/l.

Пространственно-временные характеристики показателей качества воды

При анализе пространственно-распределенных данных требуется не только оценка их первых статистических моментов, но, что очень важно, исследование пространственной связности. Допущение статистической связности, как правило, представляется слишком грубым и неконструктивным при решении широкого круга прикладных задач. Поэтому необходимо учитывать и анализировать характеристики, отражающие взаимосвязь данных в соседних областях пространства. Для решения этой задачи используются как традиционные, так и специально ориентированные технологии. При этом ключевое значение должна иметь оценка погрешностей. Если методика оценки погрешностей при оценке первых моментов – средних значений, дисперсий в зависимости от объемов выборок и характера их распределения – не вызывает проблем, то при анализе пространственной связности она порождает серьезные вопросы. Поэтому проведены оценки характера пространственной связности при использовании различных технологий.

Для повышения достоверности результатов при решении стоящих перед водопользователями практических задач целесообразно знание характера изменчивости (вариабельности) контролируемых показателей. Это тем более не-

обходимо, поскольку выяснилось, что данная величина значительна настолько, что стандартное отклонение пространственных и временных рядов часто превышает их среднее значение. При этом неожиданной оказалась согласованная вариабельность концентрации для целого ряда веществ (рис. 3). Так, из рис. 3*а* следует, что летом 2020 г. наблюдалось одновременное увеличение концентрации алюминия на скважинах 3, 9 и роднике 1г; то же весной 2018 г. и летом 2019 г. на 3 и 1г. Подобный вывод касается и скважины 3 (за исключением ранней весны 2021 и 2023 гг.). Причиной этого могло бы быть близкое расположение (< 1 км) точек контроля воды, оказавшихся вследствие этого в сходных экологических условиях, однако перечисленные пункты наблюдения удалены друг от друга на 8–14 км – от района Крылатского на юго-восток до Бирюлево. Поэтому остается предположить, что одновременное повышение концентраций алюминия здесь указывает на быстрый внутрипластовой массоперенос.

Иначе обстоит дело с нитратами (рис. 3*б*), концентрация которых была повышена на родниках 1а, 1д, 2г и 3в и особенно на скважине 5 в течение всего периода наблюдения (кроме весны 2018 г.). Маловероятно, что это результат активной сельскохозяйственной деятельности с использованием азотных удобрений. В изучаемом районе, судя по картам, полей нет, поэтому, скорее всего, нитраты попадают в почву из-за прорывов канализации или сброса хозяйственно-бытовых и промышленных вод.

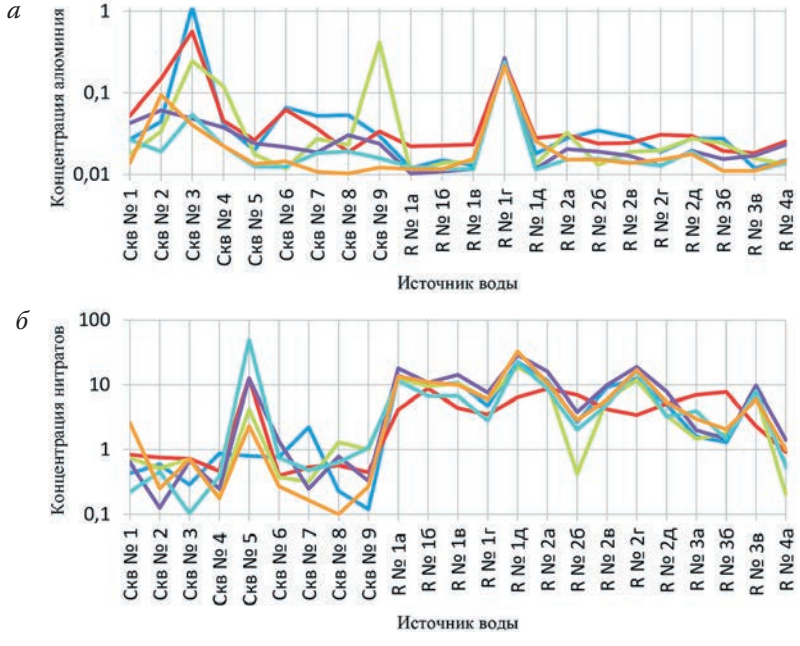


Рис. 3. Пространственно-временная динамика состава воды по алюминию (*а*) и нитратам (*б*). Цвет линий: 05.2018 – синий, 06.2019 – красный, 06.2020 – зеленый, 04.2021 – фиолетовый, 05.2022 – голубой, 05.2023 – оранжевый.
Fig. 3. Spatio-temporal dynamics of water composition for aluminum (*а*) and nitrates (*б*). Line colors: 05.2018 – blue, 06.2019 – red, 06.2020 – green, 04.2021 – purple, 05.2022 – light blue, 05.2023 – orange.

Анализ критериев, позволяющих идентифицировать естественные и техногенные факторы

Для оценки изменений химического состава воды и критериев разделения определяющих факторов рассмотрены фиксируемая относительная интенсивность изменения показателей качества воды и характер наблюдаемой структуры связности. Первый показатель анализировался с помощью статистического индикатора темпа прироста концентраций загрязняющих веществ за шестилетний период. Темп прироста отражает процентное изменение уровня вещества в каждый момент времени по сравнению с базовым уровнем (началом временного ряда). Результаты анализа для типично антропогенного загрязняющего вещества (нефтепродукта) и естественного в подземных водах элемента (кальция) представлены на рис. 4.

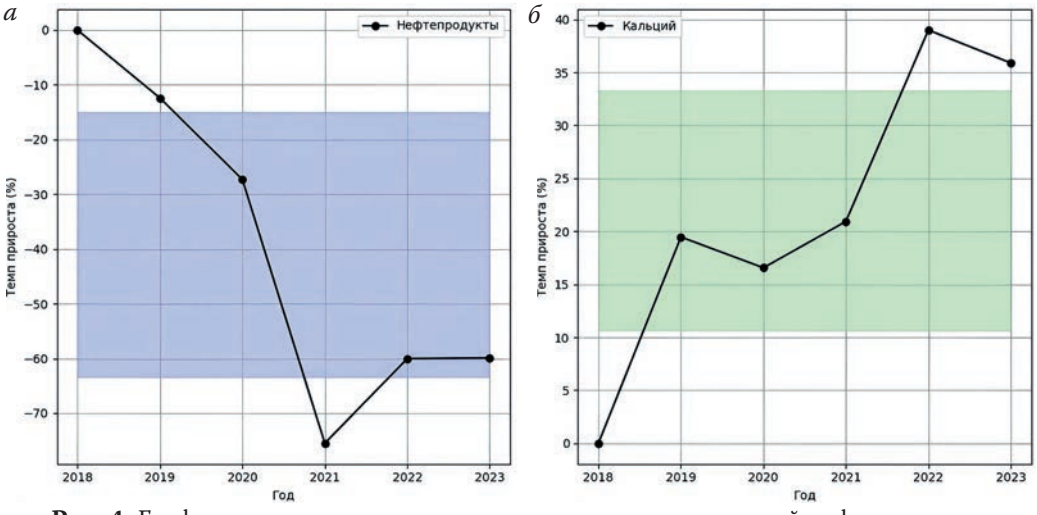


Рис. 4. Графики среднегодового темпа прироста концентраций нефтепродуктов (слева) и кальция (справа) в течение 6 лет. По оси абсцисс отложены годы измерений, по оси ординат – значения параметров в процентах. Синие и зеленые области – соответствующие доверительные интервалы.

Fig. 4. Graphs of the average annual growth rate of petroleum product concentrations (left) and calcium (right) over 6 years. The abscissa axis shows the years of measurements, and the ordinate axis shows the parameter values in percent. The blue and green areas are the corresponding confidence intervals.

Очевидно, что темпы прироста демонстрируют противоположные тенденции. Концентрация нефтепродуктов претерпевала значительные колебания, снижаясь в 2020 г. (–27,3 %) и в 2021 г. (–75,5 %). Это может указывать на воздействие как техногенных (например, изменения в интенсивности загрязнения от промышленных источников), так и природных факторов (изменения в количестве осадков или климатических условий). В случае с кальцием наблюдается положительный темп прироста его концентрации в первые два года, за которым последовало снижение в 2022–2023 годах. Эти изменения происходили с меньшими колебаниями, что говорит о более стабильных природных циклах, таких как вымывание кальция из почвы и обогащение подземных вод.

Для анализа структуры связности контролируемых веществ использован метод автокорреляции. Анализ автокорреляционной функции (АКФ) на 20 лагах показал (рис. 5), что концентрация нефтепродуктов, алюминия, марганца и нитратов на разных лагах оказалась переменной, свидетельствующей об отсутствии стабильных долгосрочных трендов.

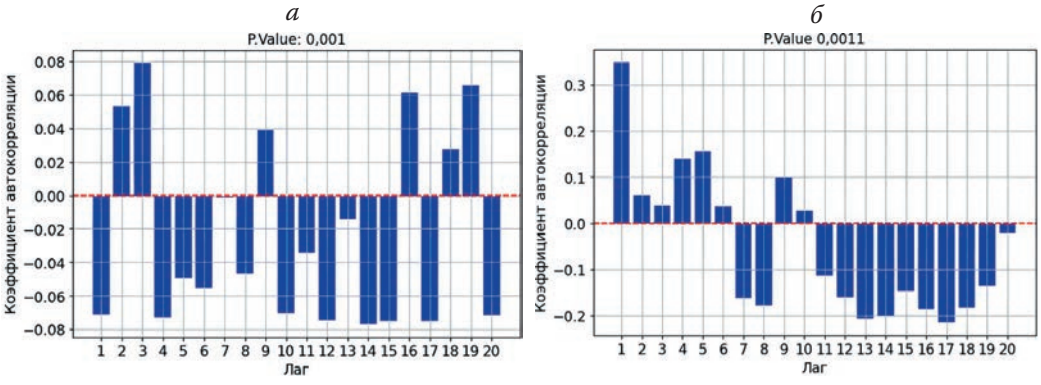


Рис. 5. АКФ для концентрации нефтепродуктов (слева) и кальция (справа).
Fig. 5. ACF for the concentration of petroleum products (left) and calcium (right).

Высокая автокорреляция (табл. 2) на первых лагах для кальция и гидрокарбонатов может свидетельствовать о естественном происхождении загрязняющих веществ.

Таблица 2. Результаты теста на внутрирядовую связность
Table 2. Results of the intra-row coherence test

Название вещества	Лаги с АКФ > 0.3
Кальций	2
Гидрокарбонат	2
Нефтепродукты	0
Марганец	0
Хлориды	0
Алюминий	0
Нитраты	0

Таким образом, посредством интеграции методов автокорреляции и статистического показателя среднегодового темпа прироста можно с высокой степенью достоверности (не превышающей уровня 0,05) идентифицировать как естественные, так и антропогенные загрязнители.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Традиционные технологии статистической обработки и анализа данных рядов наблюдения для оценки характера пространственной связности

Непараметрический метод ранговой корреляции Спирмена позволяет обрабатывать данные «низкого качества». Что же касается вышеупомянутого

быстрого массопереноса концентраций химических веществ, то индикатором этого процесса может быть высокое значение этих коэффициентов между концентрациями веществ в различных точках наблюдения. Примеры таких коэффициентов приведены в табл. 3 по отдельным пунктам наблюдения с наиболее характерными ингредиентами.

Таблица 3. Матрица характерных значений коэффициентов корреляции Спирмена для концентраций химических веществ в рассматриваемых пунктах наблюдения

Table 3. Matrix of characteristic values of Spearman correlation coefficients for concentrations of chemical substances at the observation points under consideration

Источник, вещество	1, NO_3	2, NO_3	4, NO_3	5, NO_3	7, NO_3	3, Al	4, Al	5, Al	6, Al	1, Mn	6, Mn	2в, Al	1д, Al
3, NO_3	0,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4, NO_3	-	-	-	-	-	0,83	-	-	-	-	-	-	-
7, NO_3	-	0,83	0,94	-	-	0,94	-	-	-	-	-	-	-
8, NO_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83	-	-	-
9, NO_3	-	-	-	0,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2, Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,83
3, Al	-	0,89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,94	-
7, Al	-	-	-	-	0,83	0,94	-	-	-	-	0,83	-	-
4а, Al	-	-	-	-	-	-	-	0,83	0,83	-	-	-	-
9, Al	-	-	-	-	-	-	0,99	-	-	-	-	-	-
5, Mn	-	-	0,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6, Mn	-	-	-	-	-	-	-	0,94	-	-	-	-	-

Обнаруженные повышенные корреляции возникают либо вследствие совместных сбросов сточных вод предприятий, либо как результат интенсивного массопереноса через подземные пустоты, формирующиеся при карстовых процессах [8, 9]. В частности, с таким переносом может быть связана сильная корреляция состава воды удаленных друг от друга пунктов наблюдения. Таковы, например, скважины 9 и 4, разделенные расстоянием 12 км, где коэффициент корреляции Al составляет 0,99.

Для контрольно-надзорных органов, ответственных за обеспечение экологической безопасности, важное значение имеет выявление предприятий-загрязнителей. С большой долей уверенности можно выявить подобные нарушения, если окажется, что представленные ими в форме № 2-ТП (водхоз) загрязняющие вещества, фиксируемые на разных скважинах в один момент времени, коррелированы. Из-за инфильтрации сбросов это сложно обнаружить на поверхности, но нетрудно в грунтах. Так, согласно табл. 3, на территории ЮЗАО отмечены синхронные колебания концентрации Al в скважине 3 с NO_3 и Al в скважине 7, а также Al в скважине 5 с Mn в скважине 6.

На примере пространственной связности динамики концентрации алюминия построена пространственная корреляционная функция для рассматриваемых пунктов наблюдения. Полученные таким образом зависимости коэффициентов корреляции от расстояний между пунктами наблюдения аппроксимируются экспоненциальной функцией, для чего берутся только положительные значения коэффициентов корреляции (рис. 6).

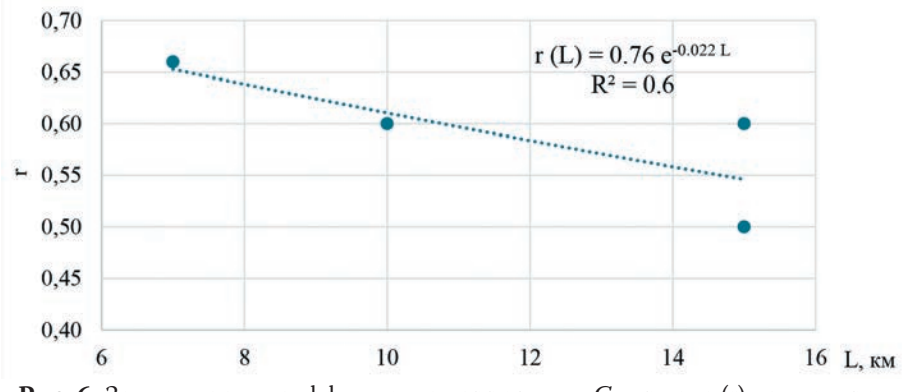


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции Спирмена (r) концентрации алюминия от расстояния между пунктами наблюдения (L).
Fig. 6. Dependence of the Spearman correlation coefficient (r) of the aluminum concentration on the distance between observation points (L).

Как следует из рис. 6, при расстояниях до 15 км коэффициенты корреляции концентраций алюминия убывают на рассматриваемой территории Теплостанской возвышенности ЮЗАО Москвы от 0,65 до 0,5. Установлено, что рассматриваемая корреляция удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью. Пространственная корреляционная функция исходя из условия однородности и изотропности описывается функцией $r(L) = \exp(-a¨L)$, для нашего случая концентрации алюминия имеем $r(L) = 0{,}76 \exp(-0{,}022¨L)$. Однако необходимо понимать, что при количестве совместных наблюдений менее 10 ошибка определения коэффициента корреляции существенно увеличивается, поэтому в данной работе проведена оценка статистических характеристик рассматриваемых химических показателей грунтовых вод на сопоставлении метода Морана с традиционными технологиями на примере кластерного анализа.

Кластерный анализ рядов наблюдений загрязняющих веществ

Для группировки объектов наблюдения в сравнительно однородные группы выполнена их классификация по исследуемым показателям (ряды наблюдений которых ограничены) с помощью кластерного анализа. Наблюдательные скважины «объединяются» в классы (агломераты) тем реже, чем значительнее они различаются по указанным показателям.

На рис. 7 и рис. 8 представлены полученные результаты. По оси абсцисс перечислены номера скважин, по оси ординат – «расстояние» между объектами, выраженное в форме корня квадратного из суммы квадратов нормированных показателей (в евклидовой метрике).

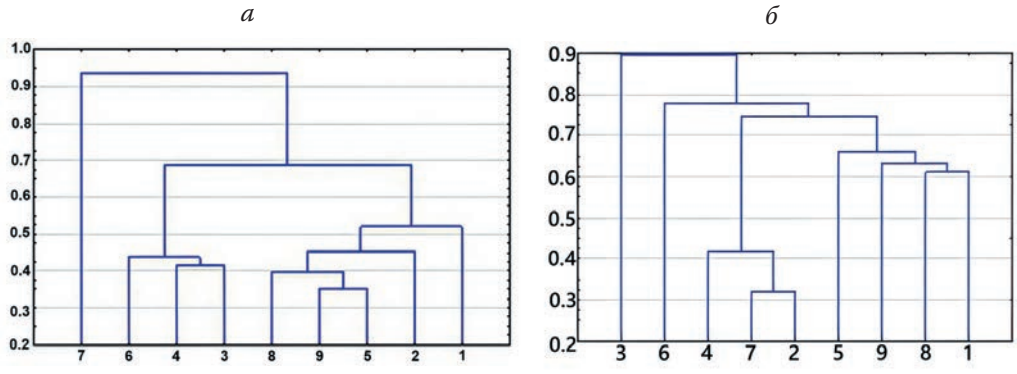


Рис. 7. Дендрограмма результатов кластерного анализа нитратов (*а*) и нефтепродуктов (*б*).
Fig. 7. Dendrogram of the results of cluster analysis of nitrates (*а*) and petroleum products (*б*).

Как видно из рис. 7*а*, наиболее четко прослеживается однородность изменения концентрации нитратов в скважинах 7 и 2, расположенных на берегу Москвы-реки (рис. 1). И если близость по тому же показателю скважины 4 может быть случайной, то не вызывает сомнений соответствующая связь сравнительно близко расположенных скважин 1, 5, 8, 9. Особое место на рисунке занимает скважина 3, что, по-видимому, связано с ее положением в районе пересечения нескольких автомагистралей с высокой степенью загрузки. Из рис. 7*б* следует, что имеется существенная разнородность наблюдаемых объектов по контролируемому признаку, что тем не менее позволяет выделить четыре группы скважин, имеющих относительно близкие характеристики по содержанию нефтепродуктов. Первая группа состоит из скважин 5, 9, 8 и приурочена к юго-восточной части Теплостанской возвышенности. Скважины удалены друг от друга на расстояние не более 2–4 км, что может свидетельствовать об общих причинах загрязнения (автодорожные выбросы, промышленная и строительная нагрузка). Следующей выделяется группа скважин 3, 4, 6. В отличие от первой группы, здесь точки наблюдения разнесены на значительные расстояния (7–8 км), тем не менее налицо сходные концентрации загрязнителя, что может быть связано с их локализацией в непосредственной близости к крупным автодорогам, в т. ч. МКАД, в равной степени создающим загрязнение рельефа и далее – грунтов. Третья группа (скважины 1 и 2) имеет менее сопоставимые характеристики концентрации, однако они локализованы недалеко друг от друга (< 4 км), что, как и в случае с первой группой, может указывать на идентичность факторов, влияющих на загрязненность грунтовой воды. Скважина 7 удалена от остальных и расположена в относительно чистом районе Крылатское, где загрязнения сведены к минимуму, вследствие чего она не входит ни в одну из перечисленных групп.

На фоне распространенного и сравнительно равномерно распределенного в горных породах марганца на рис. 8*а* отчетливо выделяются три кластера – I (скв. 9, 6, 5), II (скв. 4, 8, 3, 2) и III (скв. 7, 1) [10], очевидно, возникающих из-за дополнительного техногенного привнесения воды, загрязненной этим

металлом. Это подтверждается характером кластеризации данных, полученных с использованием индекса Морана (рис. 9) и ранговой корреляции Спирмена (табл. 2).

В отличие от марганца, алюминий не является типичным элементом для московских грунтов и характеризуется более выраженным антропогенным, чем естественным типом загрязнителя воды. Кластеризация скважин по этому веществу указывает на его повсеместное техногенное происхождение в подземных водах (рис. 8*б*). Таково следствие появления групп скважин 4, 9 и 3, 7, демонстрирующих идентичные изменения концентрации алюминия, несмотря на значительное расстояние (9–10 км), разделяющее эти точки наблюдения. Данный вывод согласуется с результатами ранговой корреляции Спирмена (табл. 2), а также с пространственной автокорреляцией Морана.

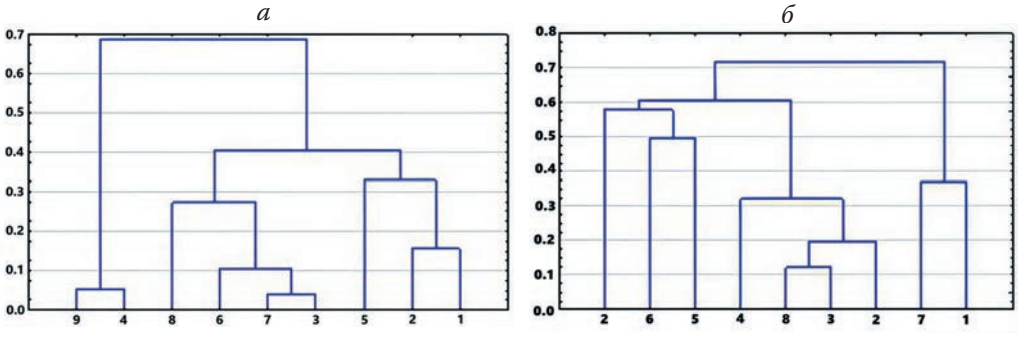


Рис. 8. Дендрограмма результатов кластерного анализа марганца (*а*) и алюминия (*б*).
Fig. 8. Dendrogram of the results of cluster analysis of manganese (*а*) and aluminum (*б*).

В целом анализ дендрограмм позволяет выделить кластеры с выраженным однородным изменением концентрации загрязнителей и соотнести эти результаты с выводами, полученными по диаграмме Пайпера, индексу Морана и корреляции Спирмена. Такие элементы, как нефтепродукты, алюминий и хлориды, имеют выраженный антропогенный фактор влияния на содержание в подземных водах, обусловленный локализацией объектов высокой техногенной нагрузки – автодорог и заправок, предприятий и строительных площадок, а также ТЭЦ. К естественным загрязнителям можно отнести марганец, гидрокарбонаты и кальций, которые широко распространены в литологическом составе горных пород, однако и они подвержены влиянию антропогенной деятельности.

Индекс Морана

Статистический показатель Moran's Index характеризует пространственную автокорреляцию и используется для оценки степени зависимости между значениями переменной в различных точках пространства [11]. Тем самым удается оценить степень взаимозависимости значений контролируемых переменных в заданной точке с той же величиной в ее окрестности. Достаточно низкий уровень статистической значимости такой связи (P. Value ≤ 0,05) указывает на то, что можно отвергнуть нулевую гипотезу о полной пространственной случайности и принять, что автокорреляция существует [12–14].

Индекс Морана равен:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} z \; z_j}{S_0 \sum_{i=1}^{n} z_i^2}, \quad (1)$$

где z_i – отклонение концентрации загрязнителя для скважины/родника i от их среднего значения $(x_i - X)$;

$w_{i,j}$ – пространственный вес между объектами наблюдения i и j, общее число которых n.

Также здесь введена совокупность всех пространственных весов:

$$S_0 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{i=1}^{n} w_{i,j}, \quad (2)$$

где статистика $z_I = \frac{I - \mathrm{E}[I]}{\sqrt{V[I]}}$, $\mathrm{E}[I] = -1/(n-1)$, $V[I] = \mathrm{E}[I^2] - \mathrm{E}[I]^2$.

С учетом приведенных соотношений и при помощи геоинформационной системы QGIS с установленным на нее модулем Smart-Map на изучаемой территории Теплостанской возвышенности выполнена оценка индексов Морана (пример за 3-й квартал 2022 г. приведен на рис. 9).

Из диаграмм Морана следует, что корреляция между содержанием кальция в скважинах и родниках в среднем низкая, для нефтепродуктов и марганца – высокая в юго-восточной части территории, для нитратов и гидрокарбонатионов – в северной, а для хлора – в центральной и южной частях. Это подтверждается и парными корреляциями, приведенными в табл. 3. Так, например, скважины 9 и 4 имеют сильную корреляционную связь даже в отдалении 12 км друг от друга.

О возможности выделения гидрохимических «фаций»

В водонасыщенных грунтах, независимо от их несущей способности, не могут формироваться устойчивые слои породы с однородными свойствами, известные в геологии как фации. Тем более это справедливо для грунтовой воды с быстрым смещением очагов ее повышенного/пониженного загрязнения. Однако возможно образование гидрохимических «фаций» на протяжении ограниченных интервалов времени. Для их обнаружения в работе был использован интерполяционный метод кригинга, позволяющий по имеющемуся набору данных получить картографическую информацию о формировании контролируемых показателей на рассматриваемом участке Теплостанской возвышенности в заданный период времени.

Были сопоставлены результаты интерполяции данных для загрязняющих грунтовые воды веществ, по которым в распоряжении авторов имелась наиболее значительная база данных в трех кварталах 2020–2023 гг. Для этого использовалась кроссплатформенная геоинформационная система QGIS. Для дальнейшего изучения пространственной корреляции гидрохимических данных в течение нескольких лет были построены вариограммы как карты пространственной интерполяции. Аналитические выводы, полученные по итогам их рассмотрения за четыре временных интервала, приведены в табл. 4. Очевидно, что фации веществ преимущественно природного происхождения

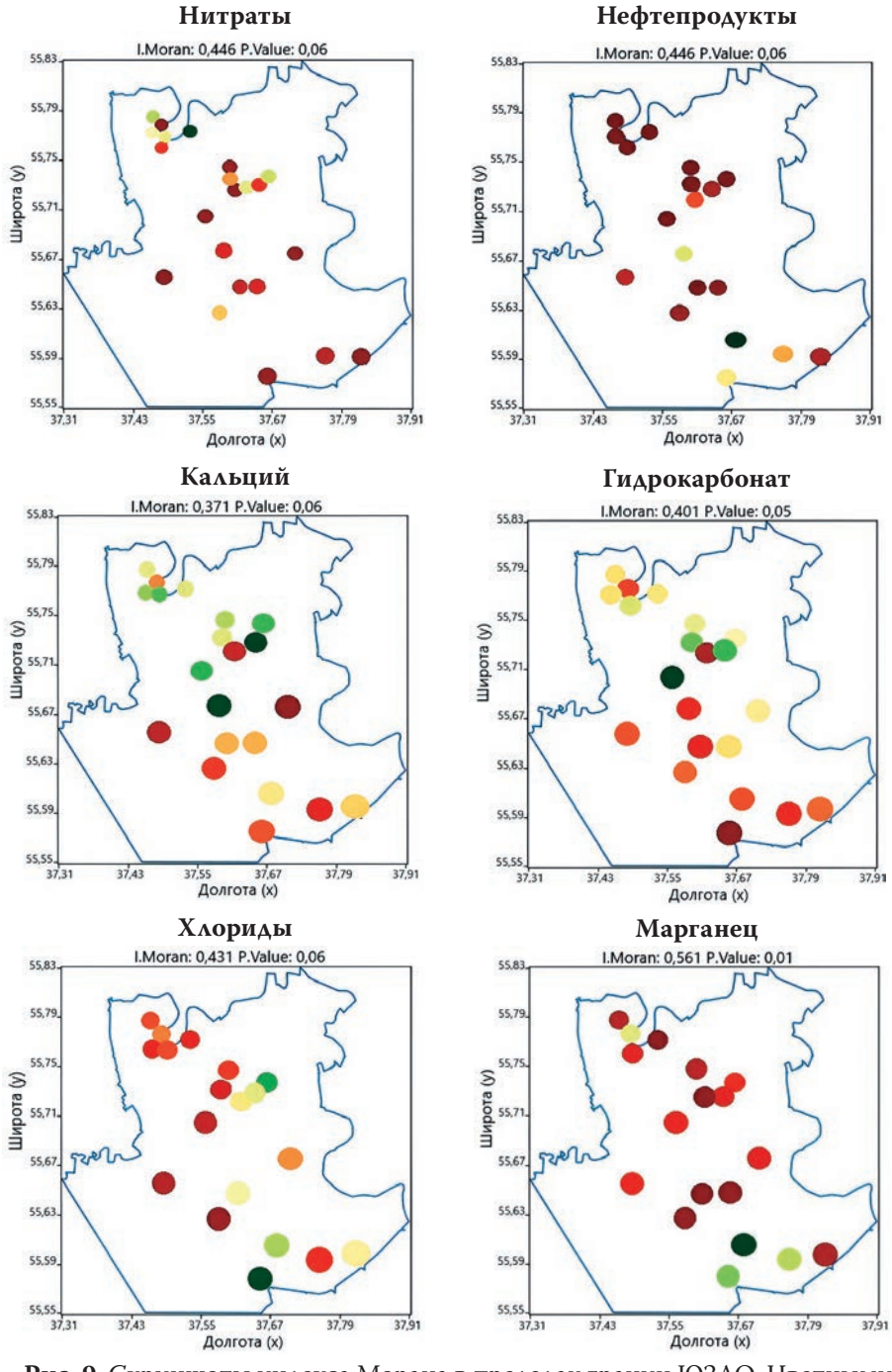


Рис. 9. Скриншоты индекса Морана в пределах границ ЮЗАО. Цветными кружками отмечены пункты наблюдения, где концентрация вещества возрастает в ряду: ярко-красные, бледно-красные, желтые, бледно-зеленые, ярко-зеленые (мг/л).
Fig. 9. Screenshots of the Moran index within the boundaries of the South-West Administrative District. The colored circles indicate observation points where the concentration of the substance increases in the following order: bright red, pale red, yellow, pale green, bright green (mg/l).

Таблица 4. Интерпретация картографических результатов
Table 4. Interpretation of cartographic results

Загрязняющее вещество	Локализация наибольших концентраций	Изменение концентрации	Гидрохимическая фация	Смещение очага загрязнения	Примечание
Нефтепродукты	юго-восточная окраина Теплостанской возвышенности	увеличение концентраций в 2 раза с 2020 по 2023 г.	смешанный Ca-Na-HCO3-Cl состав	из южной части территории в юго-восточную	Предположительно изменение концентрации обусловлено перераспределением промзон, характерных для юго-восточной части Москвы, обилием автодорог и появлением новых точек мойки машин и АЗС, ТЭЦ
Марганец	южная окраина Теплостанской возвышенности	снижение в 1,5 раза в 2022 г. и увеличение в 2,5 раза в 2023 г.	смешанный Ca-Na-HCO3-Cl состав	с юга на север, в центральную часть района. Из скв. 6 в скв. 5 и 1	Может быть связано с попаданием в данных местах удобрений, богатых марганцем, проникновением в источник воды продуктов распада растений
Кальций	северная часть Теплостанской возвышенности	стабильная концентрация	кальциево-гидрокарбонатные подземные воды (Ca-HCO3)	стабильно в северных скважинах и родниках. скв. 1, 2, 7 и группы родников 1 и 2, 4а	Выщелачивание обусловлено большим скоплением известняков
Нитраты	северная часть Теплостанской возвышенности	увеличение концентрации в 2,5 раза в течение 4 лет	кальциево-гидрокарбонатные подземные воды (Ca-HCO3)	стабильно в северо-западной части территории. Группа родников 1 и скв. 7	Наибольшая концентрация фиксируется в роднике 1д. Это связано, возможно, с расположением точки сброса сточных вод. Основными источниками загрязнения нитратами являются ТБО, протечки канализации, сбросы сточных вод, чрезмерное применение удобрений
Хлориды	центральная и восточная часть Теплостанской возвышенности	небольшой прирост в 2022 г. и высокий (в 8 раз) в 2023 г.	смешанный (Na-HCO3-Cl) состав	с северо-восточной в центральную часть территории из группы родников 2 в сторону скв. 1	Присутствие высокоминерализованных подземных вод в Обручевском районе, вблизи Воронцовского парка, где нет крупных загрязнителей (скважина 1), указывает на переток рассолов из нижележащих водоносных горизонтов по трещинам или карстовым образованиям
Гидрокарбонаты	повсеместное	небольшой прирост в 1,5 раза	смешанный (Na-HCO3-Cl) состав	с севера-востока на юг. Повышенные концентрации обнаружены на группе родников 2 и 4а	Основная причина загрязнения гидрокарбонатами – растворение известняков, доломитов, мергелей

(гидрокарбонаты, кальций) отличаются от техногенных (нефтепродукты, марганец, нитраты и частично хлориды) значительно меньшей изменчивостью. При этом для хозяйственного водоснабжения более пригодными являются кальциево-гидрокарбонатные подземные воды, локализованные в северной части Теплостанской возвышенности с низким содержанием солей. Воды смешанного состава Ca-Na-HCO3-Cl восточной и южной окраин территории с повышенной засоленностью без специальной обработки могут использоваться только в технических целях (для тушения пожаров, нужд промышленных предприятий, орошения) [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Грунтовые воды исследованного горизонта Теплостанской возвышенности, по данным УКИЗВ, в основном неудовлетворительны для хозяйственно-питьевого водоснабжения, даже родниковая вода здесь требует доочистки. При этом управление родниками не развито [16], но при строительстве необходимо учитывать их негативное влияние на физико-механические свойства грунтов, обеспечивающих надежность и устойчивость подземных сооружений.

Судя по диаграммам Пайпера, приоритетные вещества, загрязняющие грунтовые воды, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевого состава, часто с хлоридом кальция и натрия. Впрочем, в значительной степени представлены и соединения антропогенного происхождения, такие как нефтепродукты, фенолы и азотные соединения.

Обнаружены повышенные ранговые корреляции концентрации целого ряда веществ. Таковы, например, алюминий и нитраты или алюминий и марганец, что свидетельствует о возможных совместных сбросах хозяйствующими субъектами сточных вод, содержащих указанные загрязнители. Другим важным результатом являются факты синхронного повышения/понижения концентрации ряда загрязняющих веществ не только в близко расположенных между собой пунктах наблюдения, но и в разделенных расстоянием свыше 10 км. Сделано предположения о том, что это результат быстрого массопереноса загрязненной воды по подземным пустотам, возникающим в результате карстовых процессов.

В работе исследованы так называемые гидрохимические «фации», которые, в отличие от геологических комплексов, сохраняют свой состав и свойства на протяжении лишь ограниченных интервалов времени, что позволяет вести наблюдение за темпом их изменения и оценивать динамику показателей качества воды. С этой целью использован интерполяционный метод кригинга, позволивший создать картографическую информацию, отражающую изменения качества грунтовых вод. Эти данные, полученные на протяжении нескольких лет, могут служить основой для разработки эффективных стратегий управления водными ресурсами и защиты окружающей среды в условиях интенсивной урбанизации.

Результаты выполненного исследования позволили сделать определенные выводы о состоянии воды волжско-альбского терригенного комплекса на территории ЮЗАО Москвы. Однако полноценное решение поставленной задачи

маловероятно, т. к. имеется лишь ограниченная аналитика данных, полученных на основе крайне малого числа скважин, пробуренных в произвольных местах. Необходимо иметь большее количество скважин с предварительным определением их оптимального расположения для минимизации неопределенности оценок. Выполненные исследования указывают на целесообразность геостатистического кригинга для интерполяции большого количества параметров качества подземных вод [17] с целью устойчивого использования и охраны геоэкосистемы Московского региона.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

Благодарности

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией проблем гидрологии суши Горного института УрО РАН, д-ру геогр. наук, профессору Анатолию Павловичу Лепихину и ведущему инженеру Татьяне Николаевне Синцовой за полезные советы и рекомендации, которые помогли в работе над статьей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышева Е.С. Физико-механические свойства различных типов нижнемеловых грунтов территории г. Москвы // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. № 4. 2008. С. 66–69.
2. Валиев В.С., Шамаев Д.Е., Хасанов Р.Р., Иванов Д.В., Шагидуллина Р.А., Шагидуллин Р.Р. Алгоритмы интерпретации показателей качества поверхностных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 1. С. 23–30.
3. Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Бударина В.А., Косинова И.И., Маслова Н.В. Проблемы нормирования качества поверхностных вод: методики, пример // Геополитика и экогеодинамика регионов. Т. 8 (18). Вып. 2. 2022 г. С. 107–121.
4. Peeters, Luk (2014-01-01). A Background Color Scheme for Piper Plots to Spatially Visualize Hydro/chemical Patterns // Groundwater. No. 52 (1). P. 2–6.
5. Губарева Т.С., Болдескул А.Г., Трегубов О.Д., Тарбеева А.М., Шамов В.В., Лебедева Л.С., Луценко Т.Н. Экспресс-диагностика источников питания малой арктической реки по результатам краткосрочной гидрологической съемки (Чаунская низменность, Чукотка) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 1. С. 15–27.
6. Лихачева Э.А., Некрасова Л.А. Городская среда: экологические проблемы и управление природно-антропогенной системой (с позиций экологической геоморфологии) // Известия РАН. Сер. географическая. Природопользование и геоэкология. 2020. Т. 84. № 4. С. 577–587.
7. Лихачева Э.А., Аникина Н.В., Маккавеев А.Н. Трансформация водосборных бассейнов центра Москвы под влиянием градостроительства // Известия РАН. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 1. С. 136–145.
8. Khomenko V.P., Aleshina L.A. Estimation of sinkhole danger at a one-building's site in Moscow, Russia // Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Proc. 11th Multidisciplinary conference. Tallahasee, Fla., 22–26 Sept. 2008 // Geotechnical special publication. No. 183. Reston, Va.: ASCE, 2008. P. 269–277.
9. Розенталь О.М., Дубов Н.Д. Статистический анализ содержания нефтепродуктов в подземных водах Москвы // Экологические системы и приборы. 2024. № 6. С. 22–34.
10. Герасимов П.А. Геологическое строение Теплостанской возвышенности в Москве: Материалы по геологии и полезным ископаемым центральных районов Европейской части СССР. М., 1962.

11. Chen Yanguang. Spatial autocorrelation equation based on Moran's index // Scientific reports. Vol. 13. Iss. 1. 19296. 7 Nov. 2023. DOI:10.1038/s41598-023-45947-x.
12. Musakwa, Walter and Adriaan Van Niekerk. Monitoring Urban Sprawl and Sustainable Urban Development Using the Moran Index: A Case Study of Stellenbosch, South Africa // International Journal of Applied Geospatial Research. No. 5 (2014): 1–20.
13. Chen Yanguang. New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation // PLOS ONE. Vol. 8. Iss. 7. e68336. 12 Jul. 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0068336.
14. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. Том 2. Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ, 2020. 196 с.
15. Кирпичникова Н.В., Лапина Е.Е. и Кудряшова В.В. Многолетняя динамика содержания азота и фосфора в грунтовых водах водосборного бассейна Иваньковского водохранилища // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 536–545.
16. Murray Brad R.; Zeppel Melanie J. B.; Hose Grant C.; Eamus Derek. Groundwater-dependent ecosystems in Australia: It's more than just water for rivers // Ecological Management & Restoration. 2003. No. 4 (2). P. 110–113.
17. Daniel W. Gladish, Daniel E. Pagendam, Sreekanth Janardhanan, Dennis Gonzalez. Geostatistical based optimization of groundwater monitoring well network design. // Frontiers of Earth Science. 06 September 2023. Section Hydrosphere. Vol. 11. 2023. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188316.

REFERENCES

1. Malysheva E.S. Physical and Mechanical Properties of Various Types of Lower Cretaceous Soils in the Territory of Moscow. *Moscow University Bulletin*. Series 4. Geology. 2008. No. 4. P. 66–69.
2. Valiev V.S., Shamaev D.E., Khasanov R.R., Ivanov D.V., Shagidullina R.A. & Shagidullin, R.R. Algorithms for Interpreting Surface Water Quality Indicators. *Russian Journal of Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 23–30.
3. Lazarev I.S., Kochetova Zh.Yu., Budarina V.A., Kosinova I.I., Maslova N.V. Problems of Norming Surface Water Quality: Methodologies and Examples. *Geopolitics and Eco/geodynamics of Regions*. 2022. Vol. 8 (18). Iss. 2. P. 107–121.
4. Peeters, Luk. A Background Color Scheme for Piper Plots to Spatially Visualize Hydrochemical Patterns. *Groundwater*. 2014. No. 52 (1). P. 2–6.
5. Gubareva T.S., Boldeskul A.G., Tregubov O.D., Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Lebedeva L.S. & Lutsenko T.N. Express Diagnostics of the Nutrient Sources of a Small Arctic River Based on Short-Term Hydrological Surveys (Chaun Lowland, Chukotka). *Water Resources*. 2023. Vol. 50. No.1. P. 15–27.
6. Likhacheva E.A., Nekrasova L.A. Urban Environment: Environmental Problems and Management of the Natural-Anthropogenic System (from the Perspective of Ecological Geomorphology). *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series.* Nature Management and Geo/ecology. 2020. Vol. 84. No. 4. P. 577–587.
7. Likhacheva E.A., Anikina N.V. & Makkaveev A.N. Transformation of Watersheds in Central Moscow under the Influence of Urban Development. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic Series.* 2021. Vol. 85. No. 1. P. 136–145.
8. Khomenko, V.P., Aleshina L.A. Estimation of sinkhole danger at a one-building's site in Moscow, Russia. Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. Proc. 11th Multidisciplinary conference. Tallahasee, Fla., 22–26 Sept. 2008. *Geotechnical special publication*. No. 183. Reston, Va.: ASCE, 2008. P. 269–277.
9. Rozental O.M., Dubov N.D. Statistical Analysis of Oil Product Content in Groundwater in Moscow. *Ecological Systems and Instruments*. 2024. No. 6. P. 22–34.
10. Gerasimov P.A. Geological Structure of the Teplostanskaya Upland in Moscow. Materials on Geology and Mineral Resources of Central Regions of the European Part of the USSR. Moscow, 1962 [n. p.].
11. Chen Yanguang. Spatial autocorrelation equation based on Moran's index. *Scientific reports*. Vol. 13. Iss. 1. 19296. 7 Nov. 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-45947-x.
12. Musakwa, Walter and Adriaan Van Niekerk. Monitoring Urban Sprawl and Sustainable Urban Development Using the Moran Index: A Case Study of Stellenbosch, South Africa. *International Journal of Applied Geospatial Research.* 2014. No. 5. P. 1–20.

13. Chen Yanguang. New approaches for calculating Moran's index of spatial autocorrelation. *PLOS ONE*. Vol. 8. Iss. 7. e68336. 12 Jul. 2013. DOI: 10.1371/journal.pone.0068336.
14. Malinin V.N. Statistical Methods for Analyzing Hydrometeorological Information: Volume 2, Time Series and Random Fields Analysis. St. Petersburg: RGGMU, 2020. 196 p.
15. Kirpichnikova N.V., Lapina E.E. & Kudryashova V.V. Long-Term Dynamics of Nitrogen and Phosphorus Content in Groundwater of the Ivankovsky Reservoir Basin. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. No. 5. P. 536–545.
16. Murray Brad R.; Zeppel Melanie J. B.; Hose Grant C.; Eamus Derek Groundwater-dependent ecosystems in Australia: It's more than just water for rivers. *Ecological Management & Restoration*. 2003. No. 4 (2). P. 110–113.
17. Daniel W. Gladish, Daniel E. Pagendam, Sreekanth Janardhanan, Dennis Gonzalez. Geostatistical based optimization of groundwater monitoring well network design. *Frontiers of Earth Science*, 06 September 2023. Section Hydrosphere. Vol. 11. 2023. https://doi.org/10.3389/feart.2023.1188316.

Сведения об авторах:

Дубов Никита Дмитриевич, аспирант 3-го года обучения, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3; https://orcid.org/0009-0000-0068-7920; e-mail: nikita_dubov.99@mail.ru

Розенталь Олег Моисеевич, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, лаборатория управления водными ресурсами, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3; https://orcid.org/ 0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

About the authors:

Nikita D. Dubov, 3rd year Postgraduate Student, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina str., Moscow, 119333, Russia; https://orcid.org/0009-0000-0068-7920; e-mail: nikita_dubov.99@mail.ru

Oleg M. Rozental, Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Laboratory of Water Resources Management, Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, 3 Gubkina str., Moscow, 119333, Russia; https://orcid.org/ 0000-0001-6261-6060; e-mail: omro3@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 01.12.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 07.02.2025.
Принята к публикации / Accepted 13.03.2025.

УДК 556.5;551.4 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72-89*

Изменения годового модуля стока малых рек российской части бассейна реки Урал

И.А. Жуков ✉, **Д.Н. Айбулатов**

✉ les-96@yandex.ru

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время основные исследования модуля стока и динамики его изменений ведутся на средних и больших реках российской части бассейна реки Урал, изученность же модуля стока малых рек этого бассейна крайне мала. Учитывая возрастающее ухудшение экологического состояния рек, влияющее в первую очередь на годовой модуль стока воды именно на малых реках, изучение процессов его формирования, изменчивости и внутригодовых изменений становятся важнейшей задачей гидрологии. **Методы.** В основе исследования лежит всесторонний анализ годового модуля стока воды малых рек российской части бассейна реки Урал. Сформирована база данных картографической и гидрологической информации. Выполнено картирование изменений годового модуля стока малых рек, что ранее не применялось к количественным характеристикам стока малых рек. **Результаты.** Рассмотрены изменения модуля стока воды малых рек в бассейне реки Урал при практически полном отсутствии изученности его изменений. Проанализированы характеристики модуля стока малых рек до и после начала глобальных гидрологических изменений. Выявлены пространственно-временные тенденции в изменении модуля стока воды малых рек бассейна Урала. Определена граница аномальности малых рек по площади бассейна – по величине речного бассейна в 500 км^2.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: малые реки, речной сток, модуль стока малых рек, бассейн реки Урал, изменение количественных гидрологических характеристик малых рек.

Для цитирования: Жуков И.А., Айбулатов Д.Н. Изменения годового модуля стока малых рек российской части бассейна реки Урал // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 72–89. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72-89, EDN: OTQQSR

Changes in the annual runoff module of small rivers in the Russian part of the Ural River basin

Ivan A. Zhukov ✉, **Denis N. Aybulatov**

✉ les-96@yandex.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Relevance. Currently, the main studies of the runoff modulus and the dynamics of its changes are conducted mainly on medium and large rivers of the Russian part of the Ural River basin, while the study of the runoff modulus of small rivers in this basin is extremely poor. Given the increasing deterioration of the ecological state of rivers, which primarily affects the annual water runoff modulus on small rivers, the study of the processes of runoff modulus

© Жуков И.А., Айбулатов Д.Н., 2025

formation, its variability and intra-annual changes are becoming the most important task of hydrology. **Methods.** The study is based on a comprehensive analysis of the annual water runoff modulus of small rivers in the Russian part of the Ural River basin. A database of cartographic and hydrological information has been formed. The paper presents a mapping of changes in the annual runoff modulus of small rivers, which has not previously been applied to the quantitative characteristics of small river runoff. **Results.** Changes in the runoff modulus of small rivers in the Ural River basin are considered, with almost complete lack of study of changes in the runoff of small rivers. An analysis of the characteristic before and after the onset of global hydrological changes is made. Spatio-temporal trends in changes in the runoff modulus of small rivers in the Ural Basin are revealed. The boundary of the anomaly of small rivers by the basin area was identified – by the size of the river basin of 500 km^2.

KEYWORDS: small rivers, river runoff, small river runoff module, Ural River basin, changes in quantitative hydrological characteristics of small rivers.

For citation: Zhukov I.A., Aybulatov D.N. Changes in the annual runoff module of small rivers in the Russian part of the Ural River basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2025. No. 2. P. 72–89. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-72–89, EDN: OTQQSR

ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследования являются пространственные закономерности изменения количественной характеристики модуля стока воды малых рек в бассейне Урала. Цель исследования – выявить пространственные и временные изменения модуля стока воды малых рек бассейна Урала, а также сравнить полученные результаты с аналогичными данными для средних и больших рек для определения схожести закономерностей гидрологических изменений модуля стока воды у малых и больших рек, установить границу аномальности рек по площади бассейна. Актуальность данных исследований связана со слабой изученностью количественных гидрологических характеристик и величины модуля стока малых рек – самых распространенных рек на территории России.

Согласно нормативной документации (СП 529.1325800.2023 и ГОСТ 19179–73)[1,2], а также [1] в данном исследовании принято следующее определение малой реки: река, бассейн которой располагается в одной географической зоне, имеет площадь не более 2 000 км^2 и гидрологический режим которой под влиянием местных факторов может быть несвойственен для рек этой зоны.

Основная доля речной сети бассейна Урала приходится на малые реки, количество которых составляет 98 % от общего числа, длина – 71 % от суммарной длины всех водотоков бассейна[2].

Средняя величина суммы годовых осадков за период 1970–2022 гг. для исследуемой территории имеет явный восходящий тренд, зафиксированный на всех метеостанциях. Годовая сумма осадков в основном прирастает увеличением жидких осадков, а не твердых [3]. В период с 1932 по 2022 г. выявлено увеличение средней многолетней температуры с 4,1 °С в 1953 г. до 5,4 °С к 2018 г., т. е. более чем на один градус.

1 СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик», 2023.

[2] Гидрология суши: термины и определения. ГОСТ 19179-73. М.: Изд-во стандартов, 1978.

Изучение гидрологического режима для средних и больших рек в настоящее время выполнено для всех водных объектов бассейна р. Урал. В настоящем исследовании средняя река, согласно действующей нормативной документации (СП 529.1325800.2023), принята как река с площадью бассейна от 2 000 до 50 000 км^2. К большим рекам, согласно [4], относятся реки, имеющие площадь бассейна более 50 000 км^2. Полученные пространственные и временные тенденции изменений стока воды по фазам водного режима исследованы в трудах Н.Л. Фроловой [4], В.А. Балкова [5], Н.И. Алексеевского [1], Д.Е. Клименко [6] и других авторов. Для водных объектов бассейна р. Урал выполнено картирование качественных и количественных гидрологических характеристик.

Изучение аналогичных гидрологических характеристик малых рек на территории бассейна р. Урал с середины 1950-х годов, помимо сети гидрологических постов, производилось на стоковых станциях. Внутригодовой режим малых рек в разное время исследовался в работах В.С. Дыгало, Г.Е. Ландберга, средних рек – в работах И.А. Шикломанова [7], также выполнены региональные обобщения гидрологических характеристик Н.И. Коронкевичем. Однако эти исследования выполнялись в основном применительно к одному локальному водосбору. Картирование качественных и количественных гидрологических характеристик для малых рек не производилось.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Речной сток в различных районах может отличаться не только числовым значением параметров, но и составом действующих факторов (таких как уклон поверхности, протяженность путей склонового стекания, шероховатость поверхности, величина заболоченности и лесистости бассейна, наличие карстовых процессов и разгрузки грунтовых вод, угол и азимут падения водоупорных горизонтов) и характером происходящих при этом процессов [6].

В настоящее время подавляющая часть исследований модуля стока воды проводится на средних и больших реках, обходя вниманием гидрологические процессы, происходящие на малых реках. Поэтому необходимо изучить особенности, а также пространственные закономерности изменения модуля стока воды малых рек и сравнить полученные результаты с аналогичными данными по средним и большим рекам. Для этого следует получить данные о ежедневных расходах воды с гидрологических постов на малых реках, построить динамические карты и выявить пространственные и временные закономерности изменений величины модуля стока малых рек.

Методика отбора гидрологических постов

Из действующих гидрологических постов на малых реках исследуемой территории были отобраны посты и оцифрованы данные о ежедневных расходах воды на них для дальнейшего анализа речного стока и его генетических составляющих (табл. 1).

Методика отбора гидрологических постов для исследования заключалась в следующем: привлекаемые для исследования гидрологические посты должны равномерно располагаться по исследуемой территории, иметь мак-

Таблица 1. Сводная таблица исследованных гидрологических постов на малых реках бассейна р. Урал
Table 1. An assembled table of the studied hydrological posts on the small rivers of the Ural River basin

Номер	Гидрологический пост	Куда впадает
19087	р. Миндяк – с. Новобайрамгулово	р. Урал
19088	р. Урляда – д. Новоахуново	р. Урал
19092	р. Малый Кизил – пос. Муракаево	р. Урал
19106	р. Большой Кизил – с. Бурангулово	р. Урал
19108	р. Большой Кизил – д. Верхне-Абдряшево	р. Урал
19114	р. Большая Караганка – пос. Измайловский	р. Урал
19115	р. Большая Уртазымка – с. Сосновка	р. Урал
19121	р. Джуса – свх Ириклинский	р. Суундук
19122	р. Таналык – с. Самарское	р. Урал
19143	р. Кугутык – пгт Домбаровский	р. Камсак (бассейн р. Орь)
19167	р. Зилаир – с. Зилаир	р. Сакмара
19170	р. Касмарка – с. Утягулово	р. Сакмара
19172	р. Большой Ик – с. Мраково	р. Сакмара
19190	р. Черная – с. Красный Холм	р. Сакмара
19235	р. Чаган – с. Сергиевский	р. Урал
19313	р. Худолаз – пос. Чернышевский	р. Урал
19381	р. Бердянка – пос. Пугачевский	р. Урал
19383	р. Блява – г. Медногорск	р. Кураган (бассейн р. Сакмара)

симальные ряды гидрологических наблюдений в бассейнах соседних средних рек. Наличие пробелов в непрерывных наблюдениях ежедневных расходов воды более пяти лет ведет к отбраковке поста (пропуски в 1–2 года восстанавливались по зависимостям вида Q = f(H)). При наличии в бассейне реки нескольких постов (4–6 постов) на малых реках, выбирался один пост с наиболее длинным рядом наблюдений как наиболее полно характеризующий условия формирования речного стока в районе. Посты выбирали на тех реках, в бассейнах которых отсутствуют пруды, минимально влияние болот на речной сток, отсутствуют водохранилища (наличие прудов и водохранилищ для каждого привлеченного к исследованию поста определяли по базе действующих водохранилищ, а также визуально в программах ArcGis, SasPlanet и Landsat Explorer), нет карста, не ведется добыча полезных ископаемых, рубка леса. В исследуемых бассейнах должно отсутствовать антропогенное воздействие на речной сток (табл. 2).

Следуя этой методике, выбраны ряды ежедневных расходов воды для 18 гидрологических постов (рис. 1.). Площадь бассейнов малых рек, привлечен-

Таблица 2. Сводная таблица данных по гидрологическим постам на исследованных малых реках бассейна р. Урал
Table 2. An assembled table of the data from hydrological posts on the studied small rivers of the Ural River basin

Номер	Наличие пропусков в данных, лет	Наличие прудов, шт.	Заболоченность, %	Наличие водохранилищ	Закартованность, %	Добыча полезных ископаемых	Вырубка леса, %	Антропогенное воздействие, %
19087	0	0	0,26	Нет	0	Нет	0	0
19088	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19092	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19106	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19108	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19114	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19115	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19121	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19122	0	0	0,83	Нет	0	Нет	0	0
19143	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19167	2	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19170	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19172	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19190	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19235	2	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19313	0	0	0	Нет	0	Нет	0	0
19381	0	0	0,48	Нет	0	Нет	0	0
19363	1	0	0	Нет	0	Нет	0	0

ных для исследования, варьирует от 20 км^2 до 1 990 км^2. В исследовании задействованы только действующие стоковые посты, данные с уровенных постов не привлекались. В работе использованы данные о ежедневных расходах воды, полученные из ежегодников за период с 1932 по 2022 г.[3,4]

[3] Государственный водный кадастр. Основные гидрологические характеристики. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама. Л.: Гидрометеоиздат, 451 с.
[4] Государственный водный кадастр. Разд. 1. Поверхностные воды. Сер. 2. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981–1999 гг. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 25. Бассейн Каспийского моря без Кавказа и Средней Азии. Бассейн р. Камы. Уральское управление по гидрометеорологии и контролю природной среды, Свердловск, 1983–1989; Уральское межрегиональное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1999–2010.

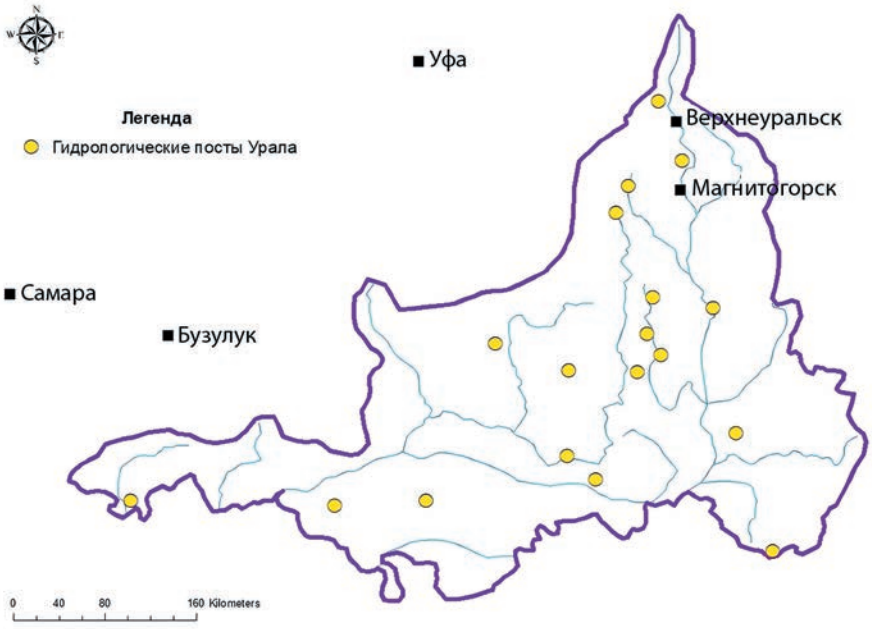


Рис. 1. Расположение задействованных в исследовании гидрологических постов.
Fig. 1. Location of hydrological posts involved in the study.

Построение и анализ разностно-интегральных кривых

Разностная интегральная кривая – это кривая, представляющая нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднего многолетнего значения временного ряда на конец каждого года [8]. Разностно- интегральные кривые необходимо построить для рядов среднегодовых модулей стока воды на исследуемых постах. На основе данных, полученных по средним и большим рекам исследуемой территории, можно предположить, что построенные разностно-интегральные кривые будут иметь экстремум (точку перегиба), приуроченную к началу глобальных гидрологических изменений.

Начало глобального потепления климата, повлекшее за собой гидрологические изменения, приходится на конец 1970-х – начало 1980-х годов, поэтому предполагается, что переломный год должен попадать во временной интервал 1980–1990 гг.

Для построения разностно-интегральной кривой вычисляется среднее значение ряда (м^3/с), затем для каждого года рассчитывается модульный коэффициент $K_i = \frac{Q_i}{Q}$, где Q_i – значение данного ряда, Q – среднее значение ряда. Далее – ординаты суммарной интегральной кривой. Для построения данной кривой последовательно суммируют отклонения модульных коэффициентов от среднего значения $K = 1$, откладывая затем по оси ординат $\Sigma(K - 1)$.

По получившимся данным построены интегральные кривые, для пространственного определения времени точек перегиба – разностно-интегральные кривые для каждого из 18 исследуемых постов.

Расчет модуля стока

Модуль стока – это объем воды, стекающей с единицы площади бассейна в единицу времени. Модуль стока воды обозначают через M л/(с × км^2) и рассчитывают по формуле:

$$M = \frac{Q \cdot 10^3}{F}, \quad (1)$$

где Q – любой расход воды (как мгновенный, например максимальный, так и средний за интервал времени Δt [9]. В настоящем исследовании в расчетах использован среднегодовой расход воды для каждого исследуемого створа. Расчеты проведены для каждого года наблюдений.

В результате получены данные многолетней динамики изменений модуля стока воды, его многолетние значения, сроки фиксации начала гидрологических изменений; также выполнено исследование величины модуля стока воды малых рек до начала гидрологических изменений и после. Полученные данные сопоставлены с аналогичными параметрами для средних и больших рек.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенной работы подробно проанализировано распределение по исследуемой территории модуля стока воды малых рек бассейна р. Урал за период 1987–2022 гг. по сравнению с 1950–1986 гг. Периоды для сравнения изменений модуля стока воды малых рек выбраны таким образом потому, что на основе анализа построенных разностно-интегральных кривых на исследуемых постах начало гидрологических изменений зафиксировано до 1986 г. Таким образом, в исследовании установлено, насколько существенны изменения модуля стока воды малых рек после начала гидрологических изменений. Рассмотрим их более подробно.

Многолетняя динамика модуля стока

Изменения среднемноголетнего модуля стока на исследуемой территории произошли неравномерно (рис. 2). Границы зон изменений модулей стока проведены по границам водосборов средних рек, а где невозможно – по границам малых рек. Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Динамика модуля стока малых рек бассейна р. Урал
Table 3. Dynamics of the Ural River basin small rivers' runoff module

Изменение характеристики	Количество постов	% от общего количества
Объем сокращается	18	70
Объем не изменяется	5	12
Объем увеличивается	9	18

Выявлена зависимость распределения характеристики по исследуемой территории: при движении с юга на север уменьшение среднемноголетнего модуля стока сменяется его увеличением. При сравнении полученных результатов и установленных закономерностей с аналогичными данными для средних и больших рек выясняется, что они совпадают.

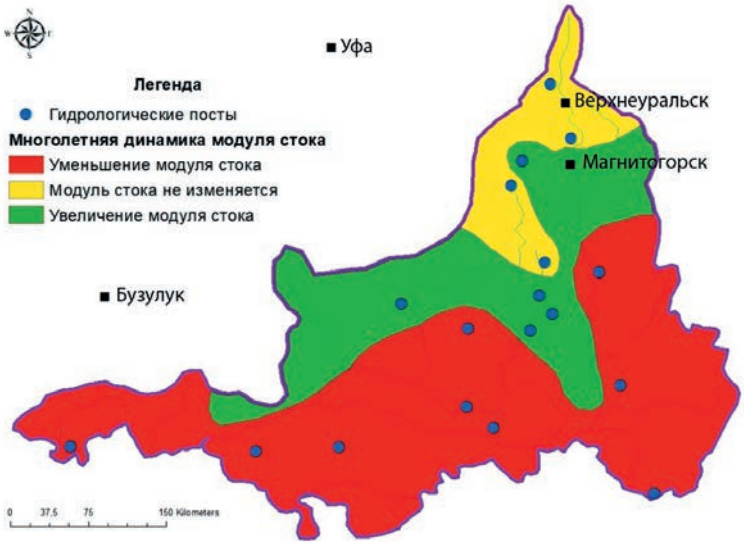


Рис. 2. Многолетняя динамика среднемноголетнего модуля стока.
Fig. 2. Long-term dynamics of the average annual runoff module.

Результаты исследования времени начала глобальных гидрологических изменений среднемноголетнего модуля стока малых рек бассейна р. Урал представлены на рис. 3 и в табл. 4. Выявлена зависимость распределения характеристики по исследуемой территории: при движении с юга на север год наступления начала изменений среднемноголетнего модуля стока фиксируется во все более поздние сроки. Результаты исследования и установленные закономерности совпадают с аналогичными данными, полученными для средних и больших рек.

Таблица 4. Сроки начала изменений модуля стока воды малых рек бассейна р. Урал
Table 4. Time of the onset of the Ural River basin small rivers' water runoff module

Период, гг.	Количество постов	% от общего количества
1970–1980	5	27,8
1980–1990	10	55,6
1990–2000	3	16,7

На исследуемой территории произошли однотипные изменения динамики среднемноголетнего модуля стока в годы глобальных гидрологических изменений – почти во всех бассейнах крупных рек модуль стока начал увеличиваться (рис. 4). Результаты анализа полученной карты представлены в табл. 5.

Таблица 5. Динамика модуля стока после начала гидрологических изменений малых рек бассейна реки Урал
Table 5. Dynamics of the Ural River basin small rivers runoff module after the onset of the hydrological changes

Изменение характеристики	Кол-во постов	% от общего количества
Модуль стока сокращается	3	16,4
Модуль стока увеличивается	15	83,6

Общая закономерность для исследуемой территории – чем южнее, тем в большем количестве бассейнов малых рек после начала глобальных гидрологических изменений среднегодовой модуль стока начал уменьшаться.

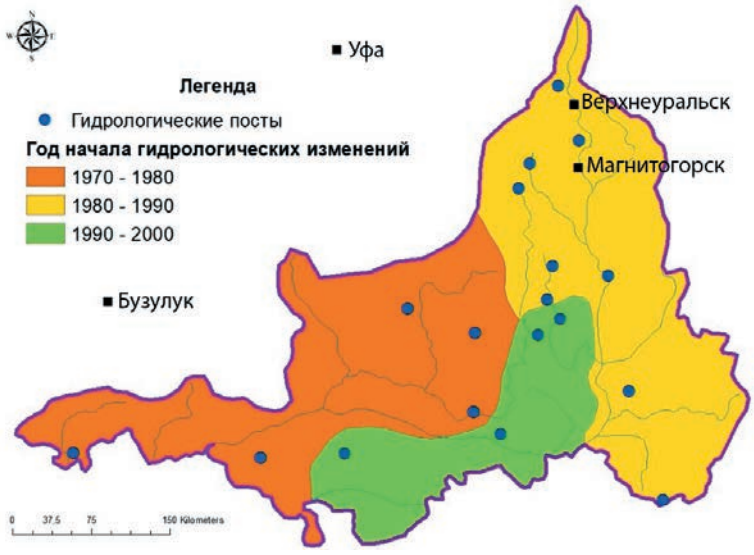


Рис. 3. Схема тенденций изменений периодов начала глобальных гидрологических изменений на малых реках для среднемноголетнего модуля стока.
Fig. 3. Scheme of trends in changes in the periods of the onset of global hydrological changes on small rivers for the average long-term runoff module.

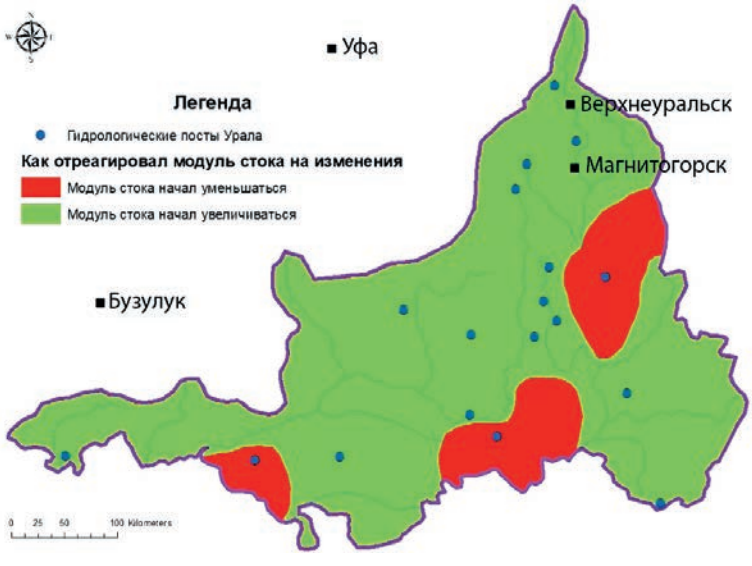


Рис. 4. Схема тенденций изменений динамики среднемноголетнего модуля стока после начала глобальных гидрологических изменений.
Fig. 4. Scheme of trends in changes in the dynamics of the average long-term runoff module after the onset of global hydrological changes.

Среднемноголетний модуль стока

Рассмотрим распределение среднемноголетнего модуля стока воды по исследуемой территории (рис. 5). Результаты анализа карты представлены в табл. 6. Общая закономерность для исследуемой территории – при движении с юга на север величина среднемноголетнего модуля стока увеличивается. При сравнении полученные результаты и установленные закономерности совпадают с аналогичными данными для средних и больших рек.

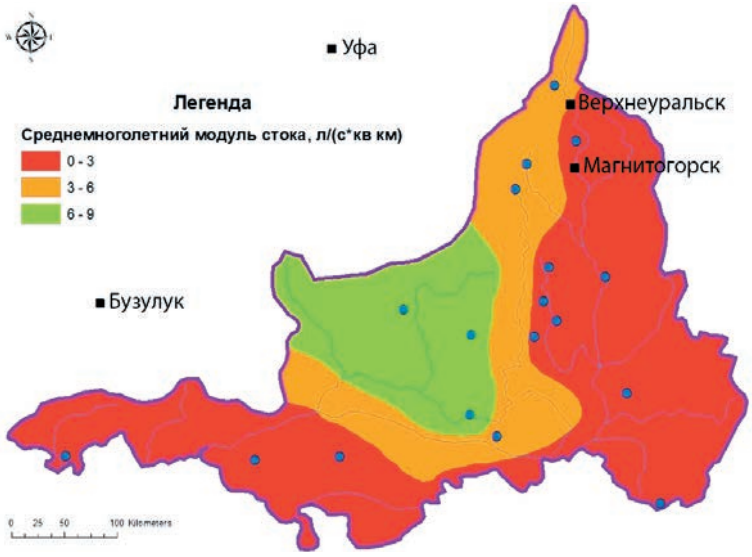


Рис. 5. Распределение величины среднемноголетнего модуля стока.
Fig. 5. Distribution of the value of the average annual runoff module.

Таблица 6. Величина среднегодового модуля стока малых рек бассейна р. Урал, л/(с × км^2)
Table 6. The value of the Ural River basin small rivers' average annual runoff module, l/(s ^{x}km^2)

Величина среднегодового модуля стока, л/(с × км^2)	Количество постов	% от общего количества
0–3	11	61,1
3–6	4	22,2
6–9	3	16,7

На основе данных, полученных при анализе разностно-интегральных кривых, проанализирована величина среднемноголетнего модуля стока до и после начала глобальных гидрологических изменений (рис. 6), результаты изменений гидрологического стока представлены в табл. 7. Установлена общая закономерность для исследуемой территории: при движении с юга на север величина среднемноголетнего модуля стока до начала гидрологических изменений увеличивается. При сравнении результатов исследования и установленных закономерностей с аналогичными данными для средних и больших рек получено их совпадение.



Рис. 6. Распределение величины среднемноголетнего модуля стока до начала гидрологических изменений.
Fig. 6. Distribution of the value of the average annual runoff module before the onset of hydrological changes.

Таблица 7. Величина среднегодового модуля стока до начала гидрологических изменений малых рек бассейна р. Урал, л/(с × км^2)
Table 7. The value of the Ural River basin small rivers' average annual runoff module before the onset of hydrological changes, l/(s × km^2)

Величина среднегодового модуля стока, л/(с × км^2)	Количество постов	% от общего количества
0–3	11	61,1
3–6	3	16,7
6–9	4	22,2

Распределение среднемноголетнего модуля стока воды по исследуемой территории после начала гидрологических изменений представлено на рис. 7, а результаты анализа карты – в табл. 8. Очевидно, что области с одинаковыми величинами среднемноголетних модулей стока после начала гидрологических изменений имеют ярко выраженную широтную зональность и тенденцию к уменьшению при движении с севера на юг. Сравнение полученных результатов исследования и установленных закономерностей с аналогичными данными для средних и больших рек также демонстрирует совпадение.

Далее было рассмотрено, на какую долю в % изменилась величина среднемноголетнего модуля стока (рис. 8, табл. 9). Определена общая закономерность для исследуемой территории: области с одинаковыми величинами изменений среднемноголетних модулей стока в процентном отношении имеют ярко выраженную широтную зональность, при движении с севера на юг увеличение модуля стока сменяется его уменьшением. Полученные в результате исследо-

вания данные об изменениях количественных гидрологических характеристиках для малых рек сопоставлены с аналогичными изменениями (из разных научных источников) для средних и больших рек. В результате совместного анализа установлено, что они совпадают.

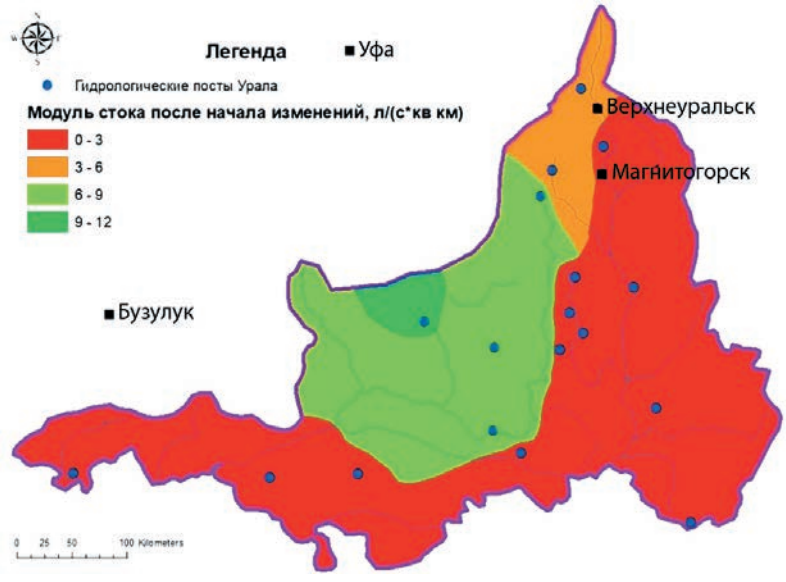


Рис.7. Распределение величины среднемноголетнего модуля стока после начала гидрологических изменений.
Fig. 7. Distribution of the value of the average annual runoff module after the onset of hydrological changes.

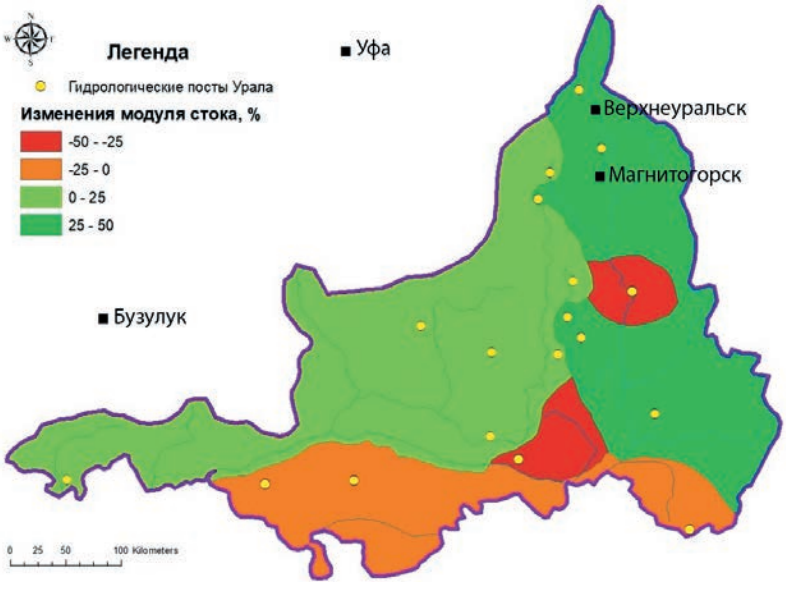


Рис. 8. Карта изменений среднемноголетнего модуля стока, %.
Fig. 8. Map of changes in the average annual runoff module, %.

Таблица 8. Величина среднегодового модуля стока после начала гидрологических изменений малых рек бассейна р. Урал, л/(с × км²)
Table 8. The value of the Ural River basin small rivers' average annual runoff module after the onset of hydrological changes, l/(s × km²)

Величина среднегодового модуля стока, л/(с × км²)	Количество постов	% от общего количества
0–3	12	66,7
3–6	2	11,1
6–9	3	16,7
9–12	1	5,6

Таблица 9. Изменения величины годового модуля стока малых рек бассейна р. Урал, %
Table 9. Changes of the Ural River basin small rivers runoff annual module value, %

Изменения величины годового модуля стока	Количество постов	% от общего количества
Общие тенденции		
Модуль стока сокращается	5	27,8
Модуль стока увеличивается	13	72,2
Количественные показатели изменения модуля стока малых рек, %		
-50 – -25	2	11,1
-25 – 0	3	16,7
0 – 25	7	38,9
25 – 50	6	33,3

Сравнение с аналогичными данными по большим и средним рекам

После анализа величин и тенденций изменения модуля стока воды малых рек было проведено их сравнение с аналогичными тенденциями для средних и больших рек (табл. 10). Полученные в результате исследования данные об изменении модулей стока воды малых рек бассейна р. Урал соотнесены с аналогичными данными для средних и больших рек: Чаган, Иртек, Илек, Салмыш, Сакмара, Большой Ик, Губерля, Таналык, Орь, Большой Кумак, Суундук, Большой Кизил, Гумбека, Урал. Данные по средним и большим рекам российской части бассейна Урала взяты из [2] и [6].

В результате анализа установлено, что тенденции изменений модуля стока после начала гидрологических изменений у малых рек аналогичны изменениям, наблюдающимся на больших реках, однако количественные показатели модуля стока у малых рек в среднем на 15 % больше, чем у больших рек. Кроме этого, сроки начала гидрологических изменений у малых рек фиксируются на 1–5 лет раньше (в зависимости от площади бассейна), чем у больших рек.

В рамках построения и анализа карт распределения гидрологических характеристик для исследуемой территории установлено, что все исследуемые гидрологические характеристики имеют зональное распространение с тен-

Таблица 10. Сравнение величин модуля стока малых и больших рек бассейна р. Урал
Table 10. Comparison of the Ural River basin small and great rivers' runoff module values

Характеристика	0–500 км^2	501–2 000 км^2	Изменения для средних и больших рек
Изменения модуля стока, %	13,7	15,4	12,5
Год начала гидрологических изменений	1990	1985	1986
Динамика модуля стока	–	–	–
Реакция модуля стока на начало гидрологических изменений	+	+	+
Среднегодовой сток, л/(с × км^2)	2,98	3,34	3
Среднегодовой сток до начала изменений, л/(с × км^2)	2,67	3,27	3
Среднегодовой сток после начала изменений, л/(с × км^2)	5,87	3,44	3,5

Примечание: знак «-» обозначает отрицательный тренд изменения модуля стока рек, «+» – положительный тренд.

денцией уменьшения с севера на юг. Для определения характера нарушений выявленных закономерностей предложены четыре критерия, по которым можно считать малую реку аномальной. Речной бассейн можно считать аномальным, если он соответствует хотя бы одному из следующих критериев:

– тенденции изменений качественных и количественных гидрологических характеристик в бассейне реки являются противоположными к фоновым значениям соседних рек;

– изменение характеристик в бассейне малой реки фиксируется более чем на один класс больше или меньше, чем фоновые значения в бассейнах соседних рек;

– если в одном бассейне средней реки фиксируются два-три гидрологических поста на малых реках, удовлетворяющие условиям пунктов 1 и/или 2, то весь бассейн этой реки считается целиком аномальным;

– если в распределении гидрологической характеристики прослеживается четко выраженная широтная зональность, а один бассейн малой реки ее нарушает, этот бассейн признается аномальным.

Для каждого поста зафиксировано количество раз, когда он определялся как аномальный, и рассчитан процент аномалий от общего числа карт. При анализе данных установлено, что малые реки бассейна Урала, имеющие площадь бассейна менее 500 км^2, аномальны более чем в 70 % случаев (табл. 11).

Таким образом, изменения в последние десятилетия отразились на величине годового модуля стока рек на преобладающей части бассейна р. Урал. Повысился годовой модуль стока по сравнению с нормой предшествующих многолетних наблюдений. В последние 20–25 лет для большинства малых рек бассейна Урала фиксируется увеличение водности.

Получены данные об изменении модулей стока в разные фазы водного режима для рек с площадью бассейна до 500 км^2 и до 2 000 км^2 в сравнении с аналогичными данными для рек с площадью бассейна до 100 000 км^2 (табл. 12).

Таблица 11. Аномальность исследуемых постов на малых реках бассейна р. Урал
Table 11. Abnormality of the posts under study on the Ural River basin small rivers

Пост	Площадь бассейна, км^2	% аномалий
19088	280	97,6
19383	216	89,6
19167	334	86,4
19106	212	79,2
19381	417	74,4
19092	503	49,6
19121	918	44,8
19190	943	40,0
19235	545	37,6
19122	1 750	35,2
19170	656	32,0
19313	997	30,4
19115	1460	28,8
19087	785	24,0
19143	767	23,2
19108	1 830	17,6
19114	1 750	12,0
19172	1 870	7,20

Таблица 12. Изменение модуля стока для рек с разной площадью бассейна, %
Table 12. Changes of the runoff module for rivers with different basin area, %

Период изменения модуля стока	0–500 км^2	501–2 000 км^2	2 000–10 000 км^2	10 000–50 000 км^2	50 000–100 000 км^2	> 100 000 км^2
Годовое изменение	2,56	15,4	13,5	11,6	9,45	7,28
Зимняя межень	38,1	59,4	50,2	43,9	37,5	27,4
Летне-осенняя межень	92,6	122	115	105	97,5	83,1
Паводки	21,3	52	43,7	35,8	29,1	21,7
Половодье	-3,91	6	5,87	5	3	2

В результате исследования зависимости интенсивности изменения величины модуля стока рек от величины речного бассейна установлена следующая закономерность: чем меньше бассейн реки, тем интенсивней изменяется модуль стока воды во все фазы водного режима. Такая закономерность прослеживается до величины речного бассейна в 500 км^2, после чего с дальнейшим уменьшением величины речного бассейна изменения модуля стока становятся хаотичными.

Доказано, что выявленные изменения модуля стока воды малых рек хорошо коррелируются с аналогичными данными по большим рекам. Для рек, имеющих площадь бассейна менее 500 км^2, выявить какие-либо закономерности изменения водного режима не удалось, т. к. они хаотичны. Таким образом, установлено, что граница аномальности рек по площади бассейна проходит по величине площади водосбора в 500 км^2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполненных исследований составлены карты гидрологических постов на малых реках бассейна р. Урал. Для 18 гидрологических постов собраны непрерывные ряды наблюдений за ежедневными расходами воды максимальной длины.

Для данных с 18 оцифрованных постов установлено, что полученные динамические изменения межгодовых колебаний и внутригодового распределения стока воды малых рек хорошо коррелируются с аналогичными данными по средним и большим рекам.

В результате сравнения полученных данных о количественных гидрологических характеристиках модуля стока воды и тенденциях их изменения для малых рек с аналогичными данными для средних и больших рек установлено, что для рек с площадью бассейна до 500 они не совпадают, а для рек с площадью бассейна 501–2 000 совпадают полностью. Однако реакция малых рек на начало гидрологических изменений и, как следствие, изменение стока воды и его генетических составляющих более интенсивная, чем у средних и больших рек. Это объясняется тем, что малые реки имеют более прочную связь с локальными факторами формирования речного стока, нежели средние реки, и поэтому даже небольшие изменения приводят к очень интенсивным изменениям генетических составляющих стока.

В результате исследований установлено, что количество выпадающих из общих тенденций изменений гидрологических характеристик крайне мало – в каждом виде исследований их число не превышает 5–7 %. Также выявлена закономерность – чем южнее, тем более существенно изменяется речной сток и его генетические составляющие.

Главным результатом исследования является выявление границы аномальности малых рек по площади бассейна – она проходит по величине речного бассейна в 500 км^2.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеевский Н.И. Гидроэкология малых рек // Малые реки: современное состояние, актуальные проблемы. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2001. С. 7–12
2. Клименко Д.Е. Годовой сток рек Урала. Пермь: Изд-во Пермского государственного национального исследовательского университета, 2011. 196 с.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова, 2022. 676 с.
4. Фролова Н.Л., Нестеренко Д.П., Шенберг Н.В. Внутригодовое распределение стока рек России // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2010. № 6. С. 8–16.
5. Балков В.А. Оценка изменений водных ресурсов малых рек в связи с усилением хозяйственной деятельности на их водосборах // Использование, регулирование и охрана водных ресурсов малых рек. Красноярск, 1987. С. 28–33.
6. Клименко Д.Е., Комлев А.М. К методам оценки характеристик стока неизученных рек // Тезисы докладов VII Всероссийского гидрологического съезда «Водные ресурсы и водный баланс водных объектов в условиях влияния антропогенной деятельности и климатических изменений». СПб., 2013. С. 155–156.
7. Шикломанов И.А. Водные ресурсы / И.А. Шикломанов, И.И. Борзенкова, В.Ю. Георгиевский, П.А. Колосов, Н.А. Сперанская, Н.И. Коронкевич // Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. II. Последствия изменения климата. М.: Росгидромет, ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2008. С. 77–86.
8. Лебедев Ю.М. Что такое малая река? // Малые реки: современное состояние, актуальные проблемы. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2001. 132 с.
9. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 312 с.
10. Водные ресурсы и водное хозяйство Урала / под ред. А.М. Черняева. Свердловск, 1977. 451 с.

REFERENCES

1. Alekseevsky N.I. Hydro/ecology of small rivers. Small rivers: Current state, topical issues. Togliatti: IEVB RAS, 2001. P. 7 (In Russ.).
2. Klimenko D.E. Annual runoff of the Ural rivers: monograph D.E. Klimenko. Perm: Publishing house of Perm State National Research University, 2011. 196 p. (In Russ.).
3. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / ed. V.M. Kattsov, 2022. 676 p. (In Russ.).
4. Frolova N.L., Nesterenko D.P., Shenberg N.V. Intra-annual distribution of river runoff in Russia. Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografia [*Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*]. 2010. No. 6. P. 8–16 (In Russ.).
5. Balkov V.A. Assessment of changes in water resources of small rivers due to increased economic activity in their catchments. Ispolzovaniye, regulirovaniye i okhrana vodnykh resursov malukh rek [*Use, regulation and protection of water resources of small rivers*]. Krasnoyarsk, 1987. P. 28–33 (In Russ.).
6. Klimenko D. E. On methods for assessing the characteristics of the runoff of unstudied rivers. D.E. Klimenko, A.M. Komlev. *Proceedings of VII All-Russian Hydrological Congress: Abstracts of reports. Water resources and water balance of water bodies under the influence of anthropogenic activity and climate change (section 2)*. St. Petersburg, 2013. P. 155–156 (In Russ.).
7. Shiklomanov I.A. Water resources / I.A. Shiklomanov, I.I. Borzenkova, V.Yu. Georgievskiy, P.A. Kolosov, N.A. Speranskaya, N.I. Koronkevich. *Assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation.* Vol. II. Consequences of climate change. Moscow: Roshydromet, State Institution "VNIIGMI-MCD", 2008. P. 77–86 (In Russ.).
8. Lebedev Yu.M. What is a small river? Small rivers: current state, topical issues. Togliatti: IEVB RAS, 2001. 132 p. (In Russ.).
9. Vinogradov Yu.B. Mathematical modeling of runoff formation processes. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 312 p. (In Russ.).
10. Water resources and water management of the Urals / edited by A.M. Chernyaev. Sverdlovsk, 1977. 451 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Жуков Иван Александрович, аспирант, кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/ 0009-0007-3035-1660; e-mail: les-96@yandex.ru;

Айбулатов Денис Николаевич, канд. геогр. наук, научный сотрудник, кафедра гидрологии суши, географический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/ 0000-0002-0180-8496; e-mail: gidroden@mail.ru

About the authors:

Ivan A. Zhukov, 3rd year postgraduate student of the Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 1119991, Russia; https://orcid.org/ 0009-0007-3035-1660; e-mail: les-96@yandex.ru

Denis N. Aybulatov, Candidate of Geographical Sciences, Researcher of the Department of Land Hydrology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 1119991, Russia; https://orcid.org/ 0000-0002-0180-8496; e-mail: gidroden@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 11.11.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 27.01.2025
Принята к публикации / Accepted 13.03. 2025.

УДК 626.812,303.6 *https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-90-106*

Экспертное и общественное мнение по оценке гидрологической ситуации в рамках Якутского водохозяйственного узла

В.П. Бондарев[1, 2] ✉, **А.С. Завадский**[1], **В.А. Чаленко**[3]

✉ valery_bondarev@mail.ru

[1]*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва*
[2]*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Россия, Москва*
[3]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, Москва*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Острота проблем управления гидрологическими и русловыми процессами и оценки социальных последствий водопользования на реках неуклонно возрастает. Изучение экспертного и общественного восприятия негативных проявлений гидрологических и русловых процессов является важной составной частью совершенствования управленческих решений в этой области. **Методы.** Для выявления экспертного и общественного мнения относительно управления гидрологическими и русловыми процессами проведен опрос ведущих специалистов данной сферы, а также интервью местного населения, попадающего под воздействие этих негативных процессов. Исследование территориально привязано к Якутскому водохозяйственному узлу. **Результаты.** Получены результаты по трем основным блокам вопросов управления гидрологическими и русловыми процессами в пределах Якутского водохозяйственного узла: характер антропогенного воздействия на русло реки и социальные эффекты этого воздействия, эффективность способов управления неблагоприятными гидрологическими и русловыми процессами, основные проблемы стратегического планирования водохозяйственной деятельности региона. Изучение экспертного мнения позволило выявить основные болевые точки, связанные с негативным воздействием гидрологических и русловых процессов. Опрос местного населения показал, что его вовлеченность в решение рассматриваемых проблем недостаточна, а отношение к сложившейся ситуации характеризуется малой информированностью, наложенной на невысокую готовность к активному участию в долгосрочном решении водохозяйственных проблем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: устойчивое управление водохозяйственным комплексом, негативные гидрологические и русловые процессы, социально-экономические риски, экспертное знание, общественное мнение, адаптация населения.

Финансирование: Сбор эмпирических данных, их обработка и интерпретация осуществлены в рамках НИР по госзаданию № 121051100166-4 географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, теоретическая интерпретация результатов проведена по плану кафедры социологии и культурологии МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для цитирования: Бондарев В.П., Завадский А.С., Чаленко В.А. Экспертное и общественное мнение по оценке гидрологической ситуации в рамках Якутского водохозяйственного узла // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 2. С. 90–106. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-90-106, EDN: XFFMVA

© Бондарев В.П., Завадский А.С., Чаленко В.А. 2025

Expert and social assessment of hydrological situation within the framework of Yakut water-economic hub

Valery P. Bondarev[1,2] ✉, **Alexander S. Zavadsky**[1], **Varvara A. Chalenko**[3]

✉ valery_bondarev@mail.ru

[1] *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[2] *Bauman Moscow State Technical School, Moscow, Russia*
[3] *«Higher School of Economics» National Research University, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The severity of the problems of managing hydrological and in-channel processes and the assessment of the social consequences of water use in rivers is steadily increasing. The study of expert and public perception of negative manifestations of hydrological and in-channel processes is an important component of improving management decisions in this area. **Methods.** In order to identify expert and public opinion for the management of hydrological and in-channel processes, a survey of leading experts in this field was conducted, as well as a supportive survey of representatives of the local population who are under the influence of these negative processes. The study was geographically linked to the Yakutsk Water management hub. **Results.** The results were obtained on the main blocks of problems of managing hydrological and in-channel processes within the Yakutsk water management hub: the nature of anthropogenic impact on the in-channel and the social effects of this impact, the effectiveness of methods of managing adverse hydrological and in-channel processes, the main problems of strategic planning of water management activities in the region. Through the study of expert opinion, the main pain points associated with the negative impact of hydrological and in-channel problems have been identified. A survey of the local population showed that their involvement in solving the problems under consideration is insufficient, and their attitude to the current situation is characterized by low awareness, superimposed on a low willingness to actively participate in the long-term solution of the problems under consideration.

KEYWORDS: sustainable management of the water-economic hub, negative hydrological and in-channel processes, socio-economic risks, expert knowledge, public opinion, adaptation of the population.

Financing: Collection of empirical data, their processing and interpretation have been accomplished within R&D according governmental assignment No. 121051100166-4 of Lomonosov Moscow University Geographical Department, theoretical interpretation has been made according the plan of Bauman Moscow State Technical School Chair of Sociology and Culturology.

For citation: Bondarev V.P., Zavadskiy A.S., Chalenko V.A. Expert and social assessment of hydrological situation within the framework of Yakut water-economic hub. Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management. 2025. No. 2. P. 90–106. https://doi.org/10.35567/19994508-2025-2-90-106, EDN: XFFMVA

ВВЕДЕНИЕ

Острота проблем, связанных с водопользованием, в современном мире неуклонно возрастает[1]. В документе ООН «Цели в области устойчивого развития» особое значение уделяется обеспечению наличия и рационального использования водных ресурсов (цель № 6)[2]. С этой точки зрения актуальное значение приобретает совершенствование методов управления гидрологическими и русловыми процессами на реках, а также оценка различных социальных последствий водопользования (повышенные смертность и заболеваемость, горизонтальная и вертикальная мобильность, чрезмерная социальная стратификация местных сообществ с тенденцией к обеднению части жителей региона и т. д.), что можно проиллюстрировать на примере наводнений во всем мире [1].

Хотя в проблематике управления водохозяйственным комплексом немало неисследованных областей, вопросы природных и антропогенных воздействий в той или иной степени систематизированы, разделы этого блока имеют сравнительно устоявшийся характер [2, 3]. Изучение социальных эффектов, которые возникают в процессе управления гидрологическими и русловыми процессами, – менее исследованная область, которая в последние десятилетия привлекает все больше внимания [1, 4–6].

Для анализа проблем, связанных с управлением гидрологическими и русловыми процессами, в настоящее время все больше применяются методы изучения общественного мнения [6–12]. Наиболее информативные данные можно получить в результате проведения комплексных исследований, для участия в которых, помимо населения, привлекаются различного рода эксперты – представители органов государственного управления, речные менеджеры и другие субъекты водопользования [13–16]. Экспертное и общественное восприятие негативных проявлений гидрологических и русловых процессов является важной составной частью совершенствования управленческих решений. В данной статье на примере Якутского водохозяйственного узла представлены возможности анализа экспертного и общественного мнения для выявления проблем управления гидрологическими и русловыми процессами.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является Якутский водохозяйственный узел (рисунок), в пределах которого на фоне постоянно возрастающего хозяйственного освоения приречных территорий и водных ресурсов происходят активные проявления гидрологических и русловых процессов, обусловленные незарегулированным водным режимом р. Лены.

Якутский водохозяйственный узел располагается в центральной части крупного расширения дна долины р. Лены (долина Туймаада), ограниченного подходящими к реке по левобережью высокими коренными мысами – Табагинским и Кангаласским. Долина Туймаада – наиболее освоенный и густо-

[1] Резолюция Первого Всероссийского съезда водопользователей. М., 2–3 февраля 2021 г. [Электр. ресурс]. URL: https://clck.ru/34LztW (дата обращения: 16.08.2024).
[2] The 17 Goals // Department of Economic and Social Affairs. Sustainable Development. United Nations. URL: https://sdgs.un.org/goals (дата обращения: 16.08. 2024).

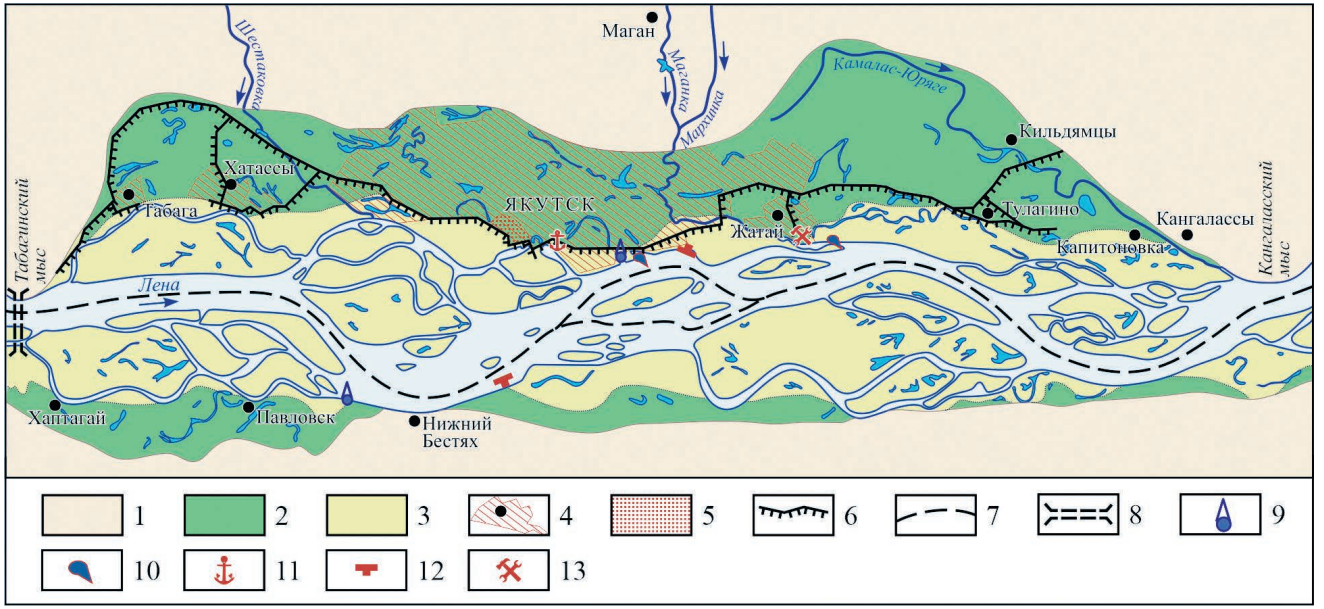


Рисунок. Схема хозяйственной освоенности Якутского водохозяйственного узла (Якутское долинное расширение): 1 – коренной берег; 2 – высокая пойма и надпойменная терраса; 3 – средняя и низкая пойма; 4 – населенные пункты и селитебные территории; 5 – намывные территории; 6 – дамбы и поднятые насыпи автодорог, выполняющие противопаводковые функции; 7 – ось судового хода; 8 – строящийся мостовой переход через р. Лену; 9 – основные водозаборные узлы; 10 – водовыпуски очистных сооружений; 11 – речной порт г. Якутска; 12 – причалы паромной переправы; 13 – Жатайский судоремонтно-судостроительный завод.

Figure. The scheme of the Yakut water-economic hub (Yakut valley expansion) economic development: 1 is fundamental bank; 2 is high floodplain and above-floodplain terrace; 3 is medium and low floodplain; 4 is inhabited locations and territories eligible for development; 5 is alluvial territories; 6 is dams and elevated road embankments with flood-protection functions; 7 is the fairway axis; 8 is the bridge passage across the Lena River under construction; 9 is the main water intakes; 10 is waste water treatment facilities outlets; 11is the Yakutsk river port; 12 is ferry berths; 13 is Zhataysk vessel repair/construction plant.

населенный район Якутии – представлена сложно-разветвленным руслом р. Лены и прилегающим с двух сторон пойменно-террасовым комплексом. На наиболее освоенном левом берегу р. Лены располагаются населенные пункты городского округа «город Якутск». Оба берега связывают многочисленные коммуникационные линии: подводные кабели связи, высоковольтная линия электропередачи, переход газопровода, паромные переправы. В 2023 г. в створе Табагинского мыса начато строительство крупнейшего (в масштабах всей Российской Федерации) инфраструктурного объекта — мостового перехода через р. Лену. В условиях такого интенсивного освоения различные формы проявления гидрологических и русловых процессов обусловливают целый комплекс водохозяйственных проблем [19, 20].

К таковым относятся активные русловые переформирования, постоянно наносящие значимый ущерб расположенным по берегам населенным пунктам и объектам экономики. Наиболее подвержен направленному эрозионному воздействию водного потока участок правого берега реки в районе пос. Нижний Бестях. За несколько десятилетий второй половины XX в. здесь были полностью уничтожены несколько улиц частного жилого сектора. Продолжающееся разрушение берега угрожает расположенным здесь складским и портовым сооружениям, объектам паромной переправы. В настоящее время русло вплотную сместилось к полотну автомобильной дороги, соединяющей (через паромную переправу) федеральные трассы «Вилюй» и «Колыма», от бровки берега на некоторых участках остается менее 10 м (на 2024 г.). Принимаемые с 2018 г. попытки стабилизации положения берега защитными сооружениями не дают должного эффекта. Активные русловые переформирования, приводящие к разрушению объектов жилой приречной инфраструктуры, характерны для левобережной системы пойменных проток, где расположены населенные пункты Старая Табага, Хатассы, Пригородный, Тулагино [21].

Важным гидротехническим сооружением г. Якутска является городской водозабор, расположенный в средней части левобережной Адамовской протоки. После произошедших в начале XXI в. переформирований русла условия водообеспечения городского водозабора в меженный период стали ухудшаться. Было принято решение о строительстве нового водозаборного комплекса (водозаборного ковша) в 300 м ниже действующего. Проект реализован в 2017–2018 гг., однако современные тренды направленности русловых процессов не были своевременно учтены, ситуация с подводом воды к головным сооружениям уже нового водозаборного узла продолжает ухудшаться, что требует ежегодного проведения большого объема дноуглубительных работ [20]. Из крупных промышленных объектов, непосредственно связанных с р. Леной в границах Якутского узла, следует выделить Жатайский судоремонтно-судостроительный завод (ЖССЗ), крупнейший в данной отрасли объект экономики Республики Саха (Якутия). С конца XX в. активная аккумуляция наносов на заходе в затон ЖССЗ существенно осложняет нормальное функционирование водоподходных путей, приводя в особо маловодные годы к прекращению транспортного сообщения с основным руслом р. Лены.

Регулярно возникают проблемы с обеспечением судоходных глубин и для транзитного судоходства. Якутск – крупный воднотранспортный узел, обеспечивающий большой объем грузоперевозок, служит логистическим центром при реализации программы северного завоза в районы Крайнего Севера. Происходящие русловые переформирования осложняют поддержание гарантированных габаритов трассы судового хода, требуя постоянного мониторинга и внедрения научных методов управления русловыми процессами [21, 22].

К перечню природных проблем Якутского узла следует отнести и вопросы, связанные с техногенной трансформацией естественных пойменных ландшафтов приречных территорий. Современная тенденция эволюции – смена сельскохозяйственных урочищ селитебными (пригодными для застройки) районами, что усиливает механические нарушения ландшафтной структуры. Водозащитные дамбы вывели значительные площади левобережной поймы из зоны затопления: в результате часть ее урочищ заболачивается или подтапливается, часть превращается в сухие пустыри с малоценными остепененными лугами [23]. В настоящее время на стадии обоснования инвестиций прорабатывается вопрос комплексной защиты всей левобережной части долины Туймаада от негативного воздействия половодий и паводков, что только усилит отмеченные процессы.

Таким образом, функционирование крупнейшей в Республике Саха (Якутия) городской агломерации (Якутского водохозяйственного узла) тесно связано с гидрологическими процессами и происходящими русловыми переформированиями на р. Лене.

Безусловно, все вышеуказанные проблемы вызывают тревогу, усложняют решение социально-экономических вопросов, принятие и реализацию управленческих решений. Для выявления восприятия негативных форм проявления гидрологических и русловых процессов в рамках Якутского водохозяйственного узла проведено изучение мнений экспертов и населения. Заметим, что опросные методы используются в географических исследованиях достаточно давно [24, 25]. Однако сложность организации водохозяйственной деятельности на участках примыкания селитебных территорий к крупнейшим рекам требует детального анализа целей и задач различных водопользователей, определения факторов, воздействующих на эффективность работы каждого из них, что не позволяет использовать простые количественные опросные методы. Выходом из ситуации может быть применение качественных методов исследования, в частности методов экспертной оценки эффективности управленческих решений с поддерживающим полуформализованным интервью населения. В отличие от количественных методов, данные в качественных исследованиях собираются в рамках небольшой группы респондентов и статистически не анализируются [26–29]. Этот подход позволяет получать результаты, которые можно применить в процессе формулирования и выбора оптимальных управленческих решений, выявления уже существующих и потенциальных социальных последствий той или иной ситуации на исследуемой территории.

Опрос проводился в период с 22 по 30 июня 2022 г. В качестве экспертов выступили представители органов федерального и регионального управле-

ния, а также руководители предприятий, в круг обязанностей которых входит организация деятельности водохозяйственного комплекса Республики Саха (Якутия). В опросе участвовало 10 экспертов, представляющих такие организации, как Ленское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов, Департамент по водным отношениям и экологическому просвещению Республики Саха (Якутия), ФБУ «Администрация Ленского бассейна внутренних водных путей», Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Лаборатория подземных вод и геохимии криолитозоны), Якутский институт водного транспорта (филиал) ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», Инженерно-технический институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Количество организаций, руководящий уровень экспертов и выбранный метод исследования позволяют считать выборку репрезентативной.

Дополнительно с помощью полуформализованного фокусированного интервью было опрошено 36 местных жителей, проживающих в населенных пунктах Пригородный, Старая Табага и Хатассы, регулярно испытывающих негативное воздействие гидрологических и русловых процессов, а также 202 микрорайона г. Якутска, где широко распространены негативные процессы, связанные с повышением динамики многолетнемерзлых пойменных грунтов. Это позволило в первом приближении оценить чувствительность местного населения к водохозяйственным проблемам, возникающим при негативном воздействии гидрологических и русловых процессов, сопоставить восприятие этих проблем представителями местных сообществ с экспертной оценкой ситуации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование позволило получить результаты по трем блокам актуальных вопросов управления гидрологическими и русловыми процессами в пределах Якутского водохозяйственного узла.

Антропогенное воздействие на русло реки и его социальные эффекты

При оценке антропогенных рисков экспертами высказаны два представления: первое – антропогенная нагрузка в данный момент не играет значительной роли; второе – из-за нестабильности и непредсказуемости поведения реки антропогенное воздействие способно привести к непрогнозируемым изменениям. Один эксперт на примере строительства городской дамбы и водозабора описывал ситуацию как «игру человека и реки». Ведущими антропогенными факторами, влияющими на гидрологические и русловые процессы в регионе, названы: гидротехнические мероприятия и сооружения; добыча рудных и нерудных полезных ископаемых; значительное количество затонувших судов; разливы нефти. Эксперты также указывали на вырубку лесов, засуху и лесные пожары. Некоторые опрошенные отмечали, что очистке акватории от затонувших судов не уделяется должного внимания. Существующие недоработки в законодательстве в области утилизации затопленных судов являются препятствием в решении данной проблемы. Отмечено также и недостаточное внима-

ние к обсуждению вопросов влияния вырубки лесов, лесных пожаров и засух на русловые и гидрологические процессы. Эксперты также считают, что маловодный период на верхней Лене 2010–2017 гг. связан с масштабной вырубкой лесов и ежегодными лесными пожарами в Иркутской области.

Социальные последствия гидрологических и русловых процессов не являются широко обсуждаемой темой у специалистов. В этом вопросе существует большой разброс мнений, которые часто недостаточно артикулированы. В первую очередь указывают на первичные последствия негативного воздействия гидрологических и русловых процессов, связанные с прямым ущербом (гибелью и ухудшением здоровья людей, потерей территорий), т. к. их достаточно просто оценить количественно. Однако часть экспертов отмечают более сложные последствия: повреждение зданий и строений; разрушение автомобильных дорог и линий электропередачи; проблемы с доступом к питьевой воде, ее низкое качество. Для сельского хозяйства выделены такие последствия, как утрата домашнего скота, снижение урожайности сельхозкультур. Последствия для водного транспорта, по мнению опрошенных, сводятся к изменению судоходных путей, недогрузу судов, повреждению инфраструктурных объектов (пристаней, причалов и навигационных знаков), повреждению судов вследствие ледоходов на территории затонов и портов. Отмечены и положительные эффекты: повышение плодородия пойменных земель и пополнение запасов подземных вод.

С точки зрения местного населения, основное внимание следует обратить на экологическую обстановку на территориях, прилегающих к руслу реки, в т. ч. на городском пляже в 202-м микрорайоне г. Якутска.

При анализе влияния неблагоприятных гидрологических и русловых процессов на ценностные установки населения эксперты указывают на отсутствие значимой динамики в социально-психологическом состоянии жителей региона, невысокий показатель миграционных настроений пострадавших от гидрологических и русловых процессов. Низкая горизонтальная мобильность населения объясняется связью традиционных промыслов с рекой, а также наличием компенсационных выплат пострадавшим. Общественное мнение в этом отношении совпадает с наблюдениями экспертов. Социально-психологическое самочувствие во время и после опасного воздействия вод характеризуется отсутствием паники, организованностью и чувством коллективизма.

Способы управления неблагоприятными гидрологическими и русловыми процессами

Минимизация риска ущерба от гидрологических и русловых процессов во многом зависит от эффективности управления. Разные управленческие структуры характеризуются наличием общих целей (оптимизацией водопользования и снижением рисков), но имеют различные экономические, социальные и экологические интересы, а также стратегии использования водных ресурсов, которые могут вступать в противоречие между собой. Местные сообщества, в свою очередь, отстаивают свои интересы в области снижения рисков неблагоприятного воздействия гидрологических и русловых процессов. Исследова-

ние показало, что местное население практически не участвует в процессах принятия соответствующих управленческих решений. В Якутске отсутствует успешная практика учета мнения населения, что не является уникальной характеристикой региона. Отметим, что в последние годы исследования общественного мнения по рассматриваемой проблеме в регионе стали проводиться [8], что должно способствовать налаживанию обратной связи с населением и учету его интересов в области преодоления последствий неблагоприятных гидрологических явлений.

Управление опасными гидрологическими и русловыми процессами включает реализацию мер по возмещению (компенсации) ущерба. По мнению ряда экспертов, возмещение за счет бюджетных средств не способствует снижению социально-экономических последствий опасных гидрологических и русловых процессов, а стимулирует население оставаться на прибрежных территориях. Эксперты полагают, что система страхования могла бы улучшить ситуацию. В свою очередь, местные жители отмечают большое расхождение в соотношении между размером компенсации и величиной причиненного ущерба.

В Якутии широко применяются различные инженерные решения для управления негативными гидрологическими и русловыми процессами. Эксперты указывают на такие факторы формирования рисков, связанных с использованием гидротехнических сооружений, как завышенные ожидания по отношению к гидрологическим сооружениям, недостаточная научная обоснованность и техническая реализация проектов, неэффективность финансирования строительства и эксплуатации соответствующих сооружений, проблемы с правовым регулированием финансирования строительства и владения гидротехническими сооружениями, недостаточное внимание к вопросам технического обслуживания и эксплуатации этих объектов. Население отмечает собственные инициативы (уборку пляжей, возведение кустарных защитных и водозаборных сооружений), не согласованные с органами управления. Часть из такого рода активностей, по мнению экспертов, может оказаться неэффективной и даже вредной.

В пределах Якутского водохозяйственного узла инженерные решения по регулированию гидрологических и русловых процессов осуществляются в комплексе с оперативными мерами, в т. ч. с мониторингом водных объектов. По мнению экспертов, основной проблемой мониторинга является недостаточное внимание к обработке и осмыслению полученных данных. Зачастую эта информация остается в пределах ведомства, которое осуществляет мониторинг. К оперативным мерам относятся сезонные подготовительные работы, проводимые МЧС и Комиссией по предупреждению и ликвидации ЧС. Подготовка населения к половодью начинается в марте. Основной проблемой, по мнению экспертов, является недостаточно эффективная система своевременного оповещения или ее полное отсутствие. К оперативным мерам относится и запрет на капитальное строительство на территориях, потенциально подверженных затоплению, и переселение жителей. Еще одной оперативной мерой являются мероприятия по предполоводному ослаблению

прочности льда (взрывы заторов, распиловка, зачернение). В их отношении мнения экспертов по поводу эффективности, безопасности и экономичности расходятся: одними высказывается утверждение, что эти мероприятия не имеют положительного эффекта и могут ухудшить ситуацию в связи с малой предсказуемостью результата, другие эксперты полагают, что проводимые мероприятия являются экологически и экономически оптимальными, а взрывы заторов – вынужденная мера. Тем не менее большая часть экспертов затруднилась дать точную оценку эффективности этих мероприятий.

Вопросы стратегического планирования водохозяйственной деятельности

В пределах Якутского водохозяйственного узла проектируется и осуществляется несколько крупных проектов, направленных на оптимизацию управления и минимизацию негативных последствий гидрологических и русловых процессов:

– строительство крупного мостового перехода через р. Лену;

– проектирование противопаводковой защиты левобережья (от с. Старая Табага до с. Кангалассы);

– обеспечение устойчивого функционирования и развития систем жилищно-коммунальной сферы, включая организацию качественного и бесперебойного питьевого водоснабжения и водоотведения;

– комплексная застройка намывных территорий в пределах поймы;

– развитие водного транспорта и водных путей.

Мостовой переход через р. Лену является одним из наиболее значимых проектов. Эксперты выделили несколько причин необходимости его строительства: национальные интересы, развитие экономики Якутии, создание опорной транспортной сети региона. Население чаще всего обращает внимание на экономические эффекты этого строительства: повышение транспортной доступности в период межсезонья, увеличение рабочих мест, снижение цен на продовольственные товары. В целом, опрос показал низкие ожидания населения по оценке «полезности» моста.

Что касается организации питьевого водоснабжения, эксперты указывают на такие проблемы, как отсутствие постоянного мониторинга качества воды, связанного в том числе с негативным влиянием русловых переформирований на функционирование основного городского водозаборного узла, осложнение ситуации с качеством воды в весенне-летний период во время паводка. Нестабильность системы водообеспечения подтверждается разбросом ответов местного населения по этому вопросу: в городах эта проблема решается в основном заказом бутилированной воды или ее самостоятельным фильтрованием; в пригородах в качестве питьевой воды используют заранее заготовленную речную, а зимой — «питьевой лед». Воду из скважин берут, как правило, на хозяйственные нужды.

Для оптимизации управления воднотранспортным комплексом, как считает большинство экспертов, необходимо: увеличить количество эксплуатируемой дноуглубительной техники; ликвидировать затонувшие суда; обновить суда и увеличить их количество; создать условия для привлечения новых

кадров. По поводу дноуглубительных работ большая часть экспертов придерживается мнения, что их объем достаточен, но, если промышленность будет развиваться и возрастут объемы судоходства, интенсивность дноуглубления нужно будет увеличивать. В частности, отмечено снижение объема дноуглубительных работ в семь раз по сравнению периодом 1970–1980 гг. Есть мнение, что раньше активное систематическое дноуглубление положительно влияло на предотвращение наводнений. Значительный разброс мнений по данному вопросу требует дальнейшего анализа.

Начатое с 1990-х годов строительство микрорайонов на намывных грунтах ранее затопляемой поймы в районе левобережья р. Лены призвано обеспечить устойчивое развитие г. Якутска и является уникальным решением в области градостроения. Взгляды экспертов по поводу перспектив застройки территории на намывных грунтах недостаточно артикулированы. Некоторые эксперты полагают, что такое строительство — оптимальный способ застройки новых территорий, другие высказывают мнение о том, что не следует уничтожать экологически нетронутые земли Зеленого луга, лучше осваивать другие зоны. Кроме того, эксперты указывают на риски, связанные с выведением значительных территорий из зоны затопления, которые сложно спрогнозировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эмпирическое исследование восприятия негативных проявлений гидрологических и русловых процессов в пределах Якутского водохозяйственного узла показало следующее.

С точки зрения экспертов, основными причинами антропогенного воздействия на изменение характера гидрологических и русловых процессов являются: гидротехнические мероприятия и сооружения, добыча рудных и нерудных полезных ископаемых, затонувшие суда, разливы нефти. Реже обращается внимание на влияние вырубки лесов, засухи и лесных пожаров. Социальные последствия гидрологических и русловых процессов экспертами выделены в меньшей степени. Чаще всего указываются первичные последствия (гибель и ухудшение здоровья людей, потеря территорий). Реже обращается внимание на повреждение зданий и строений, разрушение автомобильных дорог и линий электропередачи, проблемы с доступом к питьевой воде. В поле зрения специалистов в разной степени попадают такие проблемы, как утрата домашнего скота, снижение урожайности сельхозкультур, изменение судоходных путей, повреждение инфраструктурных объектов в результате ледоходов. При этом эксперты указывают на отсутствие значимой динамики в социально-психологическом состоянии жителей и миграционных настроений в случае негативных проявлений гидрологических и русловых процессов. Общественное мнение в этом отношении совпадает с наблюдениями экспертов.

Управленческие решения, как отмечают эксперты, в области регулирования гидрологических и русловых процессов требуют дальнейшего совершенствования. Применение инженерных решений для управления гидрологическими

и русловыми процессами, с одной стороны, порождает завышенные ожидания и ложное ощущение безопасности, с другой, имеет недостаточную научную обоснованность и проработку технической реализации проектов. Существуют также проблемы с неэффективностью финансирования и правового регулирования строительства и эксплуатации инженерных сооружений, недостаточностью внимания к их техническому обслуживанию и эксплуатации. Не обеспечен учет и контроль инициатив местного населения в рассматриваемой области. Есть мнение, что прямое возмещение ущерба целесообразно замещать системой страхования, что поможет повысить ответственность населения и увеличить его активность. Внимание также обращается на оптимизацию оперативных мер контроля над гидрологическими и русловыми процессами: мониторинг, сезонные подготовительные работы, подготовку местных жителей к половодью, своевременность оповещения, контроль над капитальным строительством на территориях, подверженных затоплению, и т. д. Неоднозначно экспертами оцениваются мероприятия по предполоводному ослаблению прочности льда, что свидетельствует о необходимости изучения этого вопроса.

Эксперты указывают, что стратегическое планирование водохозяйственной деятельности в регионе играет важнейшую роль в управлении гидрологическими и русловыми процессами. Так, мостовой переход через р. Лену может значительно повлиять на гидрологический и русловой режим территории. Эксперты в целом высоко оценивают необходимость его строительства (национальные интересы, предпосылка развития экономики и т. д.), в то же время население имеет низкие ожидания. Еще одна острая проблема, по мнению экспертов и населения, – снижение качества водообеспечения территории, связанное с негативным влиянием русловых переформирований на функционирование основного городского водозаборного узла. Кроме того, акцентировано внимание на вопросы оптимизации управления воднотранспортным комплексом. Указано на целесообразность увеличения дноуглубительных работ, ликвидацию затонувших судов, обновление и увеличение водного транспорта, привлечение квалифицированных кадров. Отмечено также расхождение в понимании необходимости выведения поймы под гражданское строительство, т. к. это может значительно изменить гидрологический и русловой режим реки.

В целом, можно констатировать, что изучение экспертных мнений позволяет выявить основные болевые точки, связанные с негативным воздействием гидрологических и русловых проблем. При этом опрос местного населения показывает, что его вовлеченность в решение рассматриваемых вопросов недостаточна, а отношение к сложившейся ситуации характеризуется малой информированностью, которая накладывается на невысокую готовность к активному участию в долгосрочном решении рассматриваемых проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no relevant conflict of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bondarev V.P. Social consequences of floods: case study of five emergencies in different global drainage basins // Geography, Environment, Sustainability. 2022. Vol. 15. No. 4. P. 188–195. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-102.
2. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. Т. 3. Антропогенное воздействие, опасные проявления и управление русловыми процессами. М.: КРАСАНД, 2019. 640 с.
3. Беркович К.М. Русла рек и деятельность человека. М: Пинтков, 2020. 146 с.
4. Rezaie A.M., Islam T., Rouf T. Limitations of institutional management and socio-economic barriers of Tidal River Management, a semi-natural process to save Bhabodaho from water-logging problem. Advances in River Sediment Research. 2013. P. 2173–2181.
5. Nayak P., Panda B. Brahmaputra and the socio-economic life of people of Assam. The Mahabahu Brahmaputra. Published by Flood and River Management Agency of Assam. Guwahati, Assam. 2016. P. 77–85.
6. Garau E., Torralba M., Pueyo-Ros J. What is a river basin? Assessing and understanding the sociocultural mental constructs of landscapes from different stakeholders across a river basin // Landscape and Urban Planning. 2021. Vol. 214. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104192.
7. Бондарев В.П., Загоревская А.О., Мякишева М.Б., Турыкин Л.А. Социально-экологические аспекты в геоэкологической оценке добычи нерудных строительных материалов в русле р. Оки // Известия Русского географического общества, 2023. Т. 155. № 2. С. 57–72. https://doi.org/10.31857/S0869607123020027.
8. Саввинова А.Н., Гаврильева Т.Н., Парфенова О.Т. и др. Восприятие населением гидрологических рисков и компенсация ущерба от наводнений в Республике Саха (Якутия) // Арктика: экология и экономика. 2024. Т. 14, № 1. С. 103–115. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-1-103-115.
9. Farahani H., Bayazidi S. Modeling the assessment of socio-economical and environmental impacts of sand mining on local communities: A case study of Villages Tatao River Bank in North-western part of Iran // Resources Policy. 2018. Vol. 55. P. 87–95. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.001
10. Lang Z., Rabotyagov S. Socio-psychological factors influencing intent to adopt conservation practices in the Minnesota River Basin // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 307. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114466.
11. Ashraf I., Ahmad S. R., Ashraf U., Khan M. Community perspectives to improve flood management and socio-economic impacts of floods at Central Indus River, Pakistan // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. Vol. 92. P. 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103718.
12. Lu Y., Tian F., Guo L., Borzì I., Patil R., Wei J., Sivapalan M. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River // Hydrology and Earth System Sciences. 2021. Vol. 25 (4). P. 1883–1903. https://doi.org/10.5194/hess-25-1883-2021.
13. Ching L., Mukherjee M. Managing the socio-ecology of very large rivers: Collective choice rules in IWRM narratives // Global Environmental Change. 2015. Vol. 34. P. 172–184. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.012.
14. Hermans C., Erickson J., Noordewier T., Sheldon A., Kline, M. Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont // Journal of Environmental Management. 2007. Vol. 84 (4). P. 534–546. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.07.013.
15. Mutahara M., Warner J.F., Khan M.S.A. Multi-stakeholder participation for sustainable delta management: a challenge of the socio-technical transformation in the management practices in Bangladesh // International Journal of Sustainable Development & World Ecology. 2020. Vol. 27 (7). P. 611–624. https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1722278.

16. Yousry L., Cao Y., Marmiroli B., Guerri O., Delaunay G., Riquet O., Wantzen K.M. A Socio-Ecological Approach to Conserve and Manage Riverscapes in Designated Areas: Cases of the Loire River Valley and Dordogne Basin, France // Sustainability. 2022. Vol. 14 (24). P. 1–38. https://doi.org/10.3390/su142416677.
17. Чалов Р.С., Кирик О.М., Ильясов А.К., Ботавин Д.В. Якутский водный узел на реке Лене – проблемы русловых процессов: история, современность, перспективы, возможности управления. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2012. № 3. С. 44–56.
18. Тананаев Н.И., Смердов В.Н. Якутский «разбой»: природная система, преобразованная человеком // Наука и техника в Якутии, 2017. № 1 (27). С. 13–19.
19. Андросов И.И., Завадский А.С. Оценка негативного воздействия вод реки Лены на населенные пункты Республики Саха (Якутия) // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны. М.: Изд-во РУДН, 2014. Т. 1. С. 5–16.
20. Чалов Р.С., Завадский А.С., Ботавин Д.В., Головлев П.П., Морозова Е.А., Сурков В.В. Покровско-Якутский водный узел на реке Лене: современные деформации и управление русловыми процессами // Известия РАН. Сер. геогр., 2019. № 6. С. 83–96.
21. Прокопьев В.П. Комплексные решения транспортных и водохозяйственных проблем в Адамовской протоке р. Лены у г. Якутска // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2006. № 2. С. 73–76.
22. Завадский А.С., Фингерт Е.А., Ботавин Д.В., Головлев П.П. Современные подходы к обоснованию генеральных схем коренного улучшения судоходных условий (на примере сложноразветвленного участка реки Лены) // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей. СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2019. С. 148–161.
23. Сурков В.В., Завадский А.С., Тузова Е.А. Техногенная трансформация поймы р. Лена в районе г. Якутск и оценка нарушенности ее ландшафтов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2024. № 29 (2). С. 235–247.
24. Тойн П., Ньюби П. Методы географических исследований. Т. 1. М.: Прогресс, 1977. 272 с.
25. Flowerdew R., Martin D. (Eds.). Methods in human geography. Pearson Education. 2005. 366 p.
26. Девятко И.Ф. Методы социологического исследования. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1998. 208 с.
27. Ядов В.А. Стратегия социологического исследования. Описание, объяснение, понимание социальной реальности. М.: Омега-Л, 2007. 596 с.
28. Ваньке А.В., Полухина Е.В., Стрельникова А.В. Как собрать данные в полевом качественном исследовании. М.: Высшая школа экономики, 2020. 256 с.
29. Александрова М.Ю., Воронина М.Н., Говорова А.Д. и др. Практики анализа качественных данных в социальных науках. М.: Высшая школа экономики, 2023. 384 с.

REFERENCES

1. Bondarev V.P. Social consequences of floods: case study of five emergencies in different global drainage basins. *Geography, Environment, Sustainability*. Vol. 15. No. 4. 2022. P. 188–195. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2022-102.
2. Chalov R.S. Riverbed Science: Theory, Geography, Practice. Vol. 3. Human Impacts, Dangerous Expressions and Management of Channel Processes. Moscow.: KRASAND. 2019. 640 p. (in Russ.).
3. Berkovich K.M. River channels and human activity. Moscow: Pintkov, 2020. 146 p. (in Russ.).
4. Rezaie A.M., Islam T., Rouf T. Limitations of institutional management and socio-economic barriers of Tidal River Management, a semi-natural process to save Bhabodaho from water-logging problem. Advances in River Sediment Research. 2013. P. 2173–2181.
5. Nayak P., Panda B. Brahmaputra and the socio-economic life of people of Assam. The Mahabahu Brahmaputra. Published by Flood and River Management Agency of Assam. Guwahati, Assam. 2016. P. 77–85.
6. Garau E., Torralba M., Pueyo-Ros J. What is a river basin? Assessing and understanding the sociocultural mental constructs of landscapes from different stakeholders across a river basin. [*Landscape and Urban Planning*]. 2021. Vol. 214. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/ j.landurbplan.2021.104192.

7. Bondarev V.P., Zagorevskaya A.O., Myakisheva M.B., Turykin L.A. Socio-Ecological Aspects in Geoecological Assessment of Nonmetal Construction Materials Mining in the Oka Riverbed. Izvestia Russkogo geograficheskogo obshchestva [*Proceedings of the Russian Geographical Society*]. 2023. Vol. 155. No. 2, p. 57–72.
8. Savvinova A. N., Gavrilyeva T. N., Parfenova O. T., Filippova V. V., Tananaev N. I. Public perception of hydrological risks and flood damage mitigation practices in the Republic of Sakha (Yakutia). Arktika: ekologia i ekonomika [*Arctic: Ecology and Economy*]. 2024. Vol. 14. No. 1, pp. 103—115. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-103-115.
9. Farahani H., Bayazidi S. Modeling the assessment of socio-economic and environmental impacts of sand mining on local communities: A case study of Villages Tatao River Bank in North-western part of Iran. *Resources Policy*. 2018. Vol. 55. 87–95. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.001.
10. Lang Z., Rabotyagov S. Socio-psychological factors influencing intent to adopt conservation practices in the Minnesota River Basin. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 307. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114466.
11. Ashraf I., Ahmad S. R., Ashraf U., Khan M. Community perspectives to improve flood management and socio-economic impacts of floods at Central Indus River, Pakistan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2023. Vol. 92. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103718.
12. Ching L., Mukherjee M. Managing the socio-ecology of very large rivers: Collective choice rules in IWRM narratives. *Global Environmental Change*. 2015. Vol. 34. P. 172–184. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.012.
13. Lu Y., Tian F., Guo L., Borzì I., Patil R., Wei J., Sivapalan M. Socio-hydrologic modeling of the dynamics of cooperation in the transboundary Lancang–Mekong River. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2021. Vol. 25 (4). P. 1883-1903. https://doi.org/10.5194/hess-25-1883-2021.
14. Hermans C., Erickson J., Noordewier T., Sheldon A., Kline, M. Collaborative environmental planning in river management: An application of multicriteria decision analysis in the White River Watershed in Vermont. *Journal of Environmental Management*. 2007. Vol. 84 (4). P. 534–546. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.07.013.
15. Mutahara M., Warner J.F., Khan M.S.A. Multi-stakeholder participation for sustainable delta management: a challenge of the socio-technical transformation in the management practices in Bangladesh. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2020. Vol. 27 (7). P. 611–624. https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1722278.
16. Yousry L., Cao Y., Marmiroli B., Guerri O., Delaunay G., Riquet O., Wantzen K.M. A Socio-Ecological Approach to Conserve and Manage Riverscapes in Designated Areas: Cases of the Loire River Valley and Dordogne Basin, France. *Sustainability*. 2022. Vol. 14 (24). https://doi.org/10.3390/su142416677.
17. Chalov R.S., Kirik O.M., Ilyasov A.K., Botavin D.V. Yakutsk water hub on the Lena River – problems of in-channel processes: history, modernity, prospects, management opportunities. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2012. No. 3. P. 44–56 (in Russ.).
18. Tananaev N.I., Smerdov V.N. Yakutsky "robbery": a natural system transformed by man. Nauka i tekhnika v Yakutiyi [*Science and Technology in Yakutia*]. 2017. No. 1 (27). P. 13–19 (in Russ.).
19. Androsov I.I., Zavadsky A.S. Assessment of the negative impact of Lena River waters on settlements of the Republic of Sakha (Yakutia). Dynamics and thermics of rivers, reservoirs and coastal zone. Moscow: Publishing House RUDN. 2014. Vol. 1. P. 5–16. (in Russ.).
20. Chalov R.S., Zavadsky A.S., Botavin D.V., Golovlev P.P., Morozova E.A., Surkov V.V. Pokrovsko-Yakutsky water hub on the Lena River: modern deformations and management of in-channel processes. Izvestia RAN [*Newsletter of Russian Academy of Sciences*]. The series is geographical. 2019. No. 6. P. 83–96 (in Russ.).
21. Prokopyev V.P. Complex solutions to transport and water management problems in the Adamovskaya channel of the Lena River near Yakutsk. Nauchnie problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka [*Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*]. 2006. № 2. P. 73–76 (in Russ.).

22. Zavadsky A.S., Fingert E.A., Botavin D.V., Golovlev P.P. Modern approaches to substantiating general schemes for radically improving navigable conditions (on the example of a complexly branched section of the Lena River). Vodnie puti i ruslovie protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniavodnykh putey [*Waterways and riverbed processes. Hydraulic engineering structures of waterways*]. St. Petersburg: GUMRF Publishing House. 2019. P. 148-161 (in Russ.).
23. Surkov V.V., Zavadsky A.S., Tuzova E.A. Technogenic transformation of the Lena River floodplain near Yakutsk and assessment of the disturbance of its landscapes. Prirodnie resursy Arktiki i Subarktiki [*Natural resources of the Arctic and Subarctic*]. 2024. No. 29 (2). P. 235–247 (in Russ.).
24. Toyne P., Newby P.T. Techniques in Human Geography. London: MacMillan. 1979. 208 p.
25. Flowerdew R., Martin D. (eds.). Methods in human geography. Pearson Education. 2005.
26. Devyatko I.F. Methods of sociological research. Yekaterinburg: Ural University Publishing House. 1998. 208 p. (in Russ.).
27. Yadov V.A. Strategy of sociological research. Description, explanation, understanding of social reality. Moscow: Omega-L. 2007. 567 p. (in Russ.).
28. Vanke A, Polukhina E., Strelnikova A. How to Collect Data in Qualitative Fiend Research. Moscow: HSE Publishing House. 2020. 256 p. (in Russ.).
29. Polukhina E.V. (ed.) The Practices of Qualitative Data Analysis in Social Sciences. Moscow: HSE Publishing House. 2023. 384 p. (in Russ.).

Сведения об авторах:

Бондарев Валерий Петрович, канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; доцент кафедры социологии и культурологии факультета социальных и гуманитарных наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», 105005, Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5; https://orcid.org/0000-0002-0236-7223; e-mail: valery_bondarev@mail.ru

Завадский Александр Сергеевич, канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1; https://orcid.org/0009-0004-6349-4789; e-mail: az200611@rambler.ru

Чаленко Варвара Алексеевна, магистрант факультета социальных наук Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», 101000, Россия, Москва, ул. Мясницкая, 20; специалист-исследователь исследовательской группы «ЦИРКОН», 108029, Россия, Москва, ул. Солянка, 3; https://orcid.org/0000-0002-4734-3196; e-mail: chalenkov@yandex.ru

About the authors:

Valery P. Bondarev, Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor, Honoured Worker of Higher Education of Russia, Senior Researcher at Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and In-Channel Processes, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia; Associate Professor of Sociology and Cultural Studies Department, Faculty of Social Sciences and Humanities, Bauman Moscow State Technical University, 2nd Baumanskaya str., 5, Moscow, 105005, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0236-7223; e-mail: valery_bondarev@mail.ru

Alexander S. Zavadsky, Candidate of Geographic Sciences, Leading Researcher at Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and In-Channel Processes, Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, https://orcid.org/0009-0004-6349-4789; e-mail: az200611@rambler.ru

Varvara A. Chalenko, Undergraduate student, Faculty of Social Sciences of the National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia; Specialist-Researcher of the ZIRCON Research Group, ul. Solyanka, 3, Moscow, 108029, Russia; https://orcid.org/0000-0002-4734-3196; e-mail: chalenkov@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 18.08.2024.
Поступила после рецензирования / Revised 27.09.2024.
Принята к публикации / Accepted 27.01.2025.

REQUIREMENTS TO MATERIALS TO BE ACCEPTED FOR PUBLICATION IN «WATER SECTOR OF RUSSIA» JOURNAL

Papers in Russian, never published anywhere before, can be accepted for publication. The optimal size of an article is to be 16–24 thousand of characters with blanks, not more than 20 pages including figures and tables.

An article is to be accompanied with a paper with information about the authors (complete name, position, academic degree, full name of an institution/company, postal address, telephone number, fax, e-mail address).

A paper should contain a Universal Decimal Classification index, key words and an abstract. The following structure can be optimal: a brief introducing part with clearly defined and characterized problem under discussion, a conceptual part, concrete conclusions from the stated material, and the list of references.

An article is to be accompanied with the English translation of the name of the article, key words, the abstract, short information on the authors (name, full and abbreviated name of the institution/company, postal address).

The text is to be typed without division of words with width alignment, Times New Roman, 12 point type, 1,5 line spacing, 2,5 cm margins from all sides. Roman figures are to be typed in the Roman type.

Numerical data are to be arranged as tables. The tables should not be ponderous. Each table is to have a number and a name. Tables are to be through numbered. Abbreviation of words in the tables are not allowed, units of measurement excluded. Numerical values in the tables and in the text are to be in the CI units.

References are to be presented in a general list in the end of the paper. References are to be numbered and arranged in a bibliographic list in accordance with GOST P 7.0.5 2008 «Bibliographic reference. General requirements and rules of composition». References in the text are to be given in square brackets (for instance, [4]), in successive order.

Figures, drawings, charts, and diagrams are to be inserted into the text as separate files each. General number of figures is not to exceed 10–12.

An electronic version of an article in Microsoft Word is to be sent with e-mail. Photographs, drawings, figures, charts, diagrams are to be presented additionally as separate files in JPEG and TIFF with resolution at least 300 dpi, 9×12 cm at least, all diagrams in Excel.

Manuscripts are reviewed and edited in RosNIIVKh editorial office.

Materials meant for publication are to be submitted to RosNIIVKh, e-mail address: info@waterjournal.ru.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРИНИМАЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО РОССИИ»

К публикации принимаются ранее не публиковавшиеся статьи на русском языке. Оптимальный объем статей составляет 0,4–0,6 авторского листа (16–24 тыс. знаков с пробелами, не более 20 с., включая рисунки и таблицы).

Статьи должны иметь **индекс УДК, ключевые слова** (10–15 слов) **и автореферат** (аннотацию), объем аннотации – 150–200 слов. Оптимальной является следующая структура статьи: краткая вводная часть с четкой формулировкой и характеристикой обсуждаемой проблемы, содержательная часть, конкретные выводы, вытекающие из изложенного материала, список литературы.

К статье необходимо приложить **перевод на английский язык названия, ключевых слов, аннотации и сведений об авторах** (ФИО полностью, должность, ученая степень и ученое звание, полное наименование организации, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты).

Текст набирается **без переносов** с выравниванием по ширине страницы, шрифт Times New Roman, **кегль 12, межстрочный интервал 1,5, поля 2,5 см со всех сторон.** Римские цифры набираются в английском регистре.

Цифровые данные оформляются в виде таблиц. Каждая таблица должна иметь порядковый номер и название. Нумерация таблиц – сквозная. Сокращения слов в таблицах не допускаются, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблицах и тексте должны приводиться в единицах измерения СИ (обязательных).

Ссылки на литературные источники следует давать в квадратных скобках (например, [4]), порядок нумерации последовательный – по мере появления ссылок в тексте статьи.

Цитируемая литература приводится списком в конце статьи. Литературные источники должны быть пронумерованы и оформлены в библиографический список в соответствии с ГОСТом Р 7.0.5 2008. Пристатейный список литературы на латинице References в системе транслитерации LC размещается сразу за списком литературы.

Рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы вставляются в текст статьи как объект. **Общее количество рисунков в статье не должно превышать 10–12.**

Для публикации представляется электронный вариант статьи в формате текстового редактора Microsoft Word. **Фотографии, рисунки, чертежи, графики, схемы, диаграммы дополнительно представляются в виде отдельного файла (рисунки, чертежи, графики, схемы – в формате Corel Draw, tiff, jpg разрешением 300 dpi размером не менее 9×12 см, диаграммы – в формате Excel).**

Материалы для публикации необходимо направлять в РосНИИВХ по электронной почте info@waterjournal.ru.

Редакторы: Т.М. Принцева, Н.А. Валек, В.А. Федотов
Перевод А.Б. Кочев
Подписано в печать 07.04.2025. Дата выхода в свет 21.04.2025.
Формат 70x100 $^{1}/_{16}$. Усл. печ. л. 6,75. Тираж 200 экз. Цена свободная.
Отпечатано в типографии ООО «ДжиЛайм»,
юридический адрес: 620078, г. Екатеринбург, ул Мира 37-25.
Тел.: +7(343)362-42-28, www.glime.ru, e-mail: g_lime@mail.ru

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Федеральное агентство водных ресурсов является органом исполнительной власти по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в сфере водных ресурсов.

Адрес: 117292, Москва, ул. Кедрова, дом. 8, корп. 1
Станции метро: Академическая, Профсоюзная
Телефон: 8 (499) 125-52-79
E-mail: water@favr.ru, http://voda.mnr.gov.ru

ФГБУ РОССИЙСКИЙ НИИ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

ФГБУ РосНИИВХ – научное подразделение Федерального агентства водных ресурсов, создан для научного обеспечения государственных функций управления использования и охраны водных ресурсов, разработки нормативно-методической и проектной документации, направленной на устойчивое развитие водного хозяйства России и экономическую безопасность водопользования.

В структуру института входят филиалы в Екатеринбурге, Владивостоке, Чите, Перми, Уфе.

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ ЖУРНАЛА:
Россия, 344037, г. Ростов-на-Дону, ул. Ченцова, здание 10а
Тел.: (863) 285-30-24
Сайт: http://wrm.ru, e-mail: rwec@rwec.ru

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Рег. номер ПИ № ФС77-82772 от 4 марта 2022 г.

Выходит с 1999 года 6 раз в год.

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ И РЕДАКЦИИ: 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23
Тел. главного редактора (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© ФГБУ РосНИИВХ

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

The title is registered in the State Committee of the Russian Federation for Press on May 21, 1999. Registration Number 018825

The journal is issued since 1999 6 times a year.

Address of the Publisher and Editoral Board: Ul. Mira, 23, Ekaterinburg 620049 Russia
Chief Editor (343) 287-65-71. E-mail: info@waterjournal.ru, www.waterjournal.ru

© FGBU RosNIIVKh

The journal is included into the List of the scientific journals and editions subject to peer-review where the main scientific outcomes of the thesis for academic degrees of doctors and candidates of sciences are to be published

Индекс / Index 39076

